

福井大学予備審査  
学位論文〔博士（工学）〕

熱収支法を用いた広域路面温度予測の研究

平成 25 年 3 月

齊 田 光

# 目次

学位論文の要旨	4
1. 序論	6
1.1 研究の背景	6
1.2 既往の路面温度予測モデル	7
1.2.1 定点路面温度予測モデル	7
1.2.2 広域路面温度予測モデル	8
1.3 研究の目的	9
1.4 本論文の構成	9
2. デジタル標高データを用いた広域気象算定法	12
2.1 はじめに	12
2.2 広域気象算定方法	13
2.3 太陽高度および方位角の算定	13
2.4 雲高および雲量による日射フラックスおよび長波放射フラックスの補正	14
2.4.1 快晴時における直達日射フラックスおよび散乱日射フラックス	14
2.4.2 雲がある場合の直達日射フラックスおよび散乱日射フラックス	14
2.4.3 快晴時における長波放射フラックス	15
2.4.4 雲がある場合の長波放射フラックス	15
2.5 沿道地形が道路気象に与える影響	16
2.5.1 沿道地形を考慮した日射フラックスの算定方法	16
2.5.2 沿道地形による影響を考慮した長波放射フラックスの予測理論	18
2.6 広域気象算定法の精度検証	18
2.6.1 実験概要	18
2.6.2 実験結果	26
2.6.3 解析結果	26
2.7 おわりに	27
3. 広域路面温度予測モデル	33
3.1 はじめに	33
3.2 路面熱収支モデルの熱移動理論	33
3.3 広域路面温度予測モデルの計算高速化	34
3.3.1 地形面要素の最適化	35
3.3.2 不可視面要素の計算除外	36
3.3.3 路面温度の計算手順	36
3.4 気象実測値を用いた SAFF モデルの精度検証実験および解析	37
3.4.1 実験および計算概要	37
3.4.2 実測値と予測値の比較	43
3.4.3 計算精度	44
3.4.4 計算時間の短縮効果および計算精度に与える影響	44
3.5 数値予報データを用いた SAFF モデルの精度検証実験	45

3.5.1	実験および予測概要	45
3.5.2	実測値と予測値の比較	49
3.6	おわりに	50
4.	広域路面温度予測モデルの精度改善	54
4.1	はじめに	54
4.2	航空レーザ測量データ(LPデータ)を用いた広域路面温度予測の高精度化	54
4.2.1	はじめに	54
4.2.2	気象およびサーマルマッピングの概要	54
4.2.3	計算条件	58
4.2.4	観測値と計算値の比較	58
4.2.5	おわりに	61
4.3	道路気象センサ実測値を用いた補正路面温度予測モデル	63
4.3.1	はじめに	63
4.3.2	R-RSTF モデルの概要	63
4.3.3	R-RSTF モデルの精度検証方法	64
4.3.4	観測および計算結果	64
4.3.5	おわりに	65
4.4	気温長期観測データを用いた気温予報値の補正	66
4.4.1	はじめに	66
4.4.2	気温計測地点における気温予測値の補正方法	66
4.4.3	気温予測値と予測誤差の関係の評価	67
4.4.4	任意の地点における気温予測値の補正方法	69
4.4.5	気温補正モデル適用による路面温度予測精度改善効果の検証	70
4.4.6	おわりに	71
5.	結論	76
5.1	本研究のまとめ	76
5.2	今後の課題と展望	77
6.	補遺	79
6.1	はじめに	79
6.2	中部縦貫自動車道永平寺大野道路における広域路面温度予測モデルの適用	79
6.2.1	計算条件	79
6.2.2	計算結果	85
6.3	北近畿豊岡自動車道における広域路面温度予測モデルの適用	87
6.3.1	導入効果の検討対象となる無散水融雪システムの概要	87
6.3.2	計算条件	87
6.4	おわりに	93

# 学位論文の要旨

---

本研究では、効率的な冬期道路管理を行うために、熱収支による広域路面温度予測システムの開発を試みた。そのために、デジタル標高モデル(DSM)を用いた広域気象予測法に加えて、路面温度を面的に予測する熱収支モデル(SAFF モデル)を構築し、精度検証を行った。また、SAFF モデルの精度を改善するために DSM 解像度の改善、気温予報値の補正手法の開発および道路気象センサによる実測値の利用手法の開発を行った。さらに、兵庫県北近畿自動車道および福井市南部においてサーマルマッピングを実施し、SAFF モデルの妥当性および精度検証を行った。

**第1章 序論**では、冬期道路管理の現状と課題を挙げ、冬期道路管理の効率化を実現するための手法として路面温度予測結果に基づく除雪および凍結防止剤散布時期の適正化が有効であることを述べた。既存の路面温度予測モデルの問題点を解決するためには、第2章から第4章で述べる SAFF モデルの構築および計算精度の検証が必要であることを述べた。

**第2章 デジタル標高データを用いた広域気象算定法**では、DSM および数値予報を用いて日射および長波放射フラックスを予測するための広域気象算定法を構築した。また、同法の妥当性を検証するために兵庫県北近畿豊岡自動車道において日射および長波放射フラックスの路線(線的)計測を行った。その結果、広域気象算定法は、沿道地物および気象条件に伴う日射および長波放射フラックスの路線変化の予測を概ね再現できることが示された。広域気象算定法による日射フラックスの予測誤差は主に DSM で表現できないような小さな沿道地物による日射遮蔽判定の誤りに起因することが明らかとなった。

**第3章 広域路面温度予測モデル**では、SAFFモデルを構築し、実際の道路管理を念頭に計算を高速化する方法を構築し、その精度について検討した。そのために、兵庫県北近畿豊岡自動車道において野外観測を行い、路面温度、日射フラックスおよび長波放射フラックスについて実測値と計算値の路線分布からSAFFモデルの精度を詳細に評価した。その結果、SAFFモデルによる路面温度誤差の観測期間に亘る空間(路線)平均誤差は $1.5^{\circ}\text{C}$ であり、定点を対象とした従来の路面温度予測と同程度となった。また、路面温度誤差 $<1^{\circ}\text{C}$ の空間的中率は58%、路面温度誤差 $<2^{\circ}\text{C}$ のそれは86%であった。SAFFモデルでは、地形面要素数の削減および不可視地形面要素の計算除外による計算高速化手法を開発し、高速化を図らない場合と比較して計算精度を低下させることなく計算時間を1/23に短縮することが可能となった。また、SAFFモデルの気象入力条件として、実測値の代わりに数値予報値を用いた場合、路面温度の平均誤差は $1.8^{\circ}\text{C}$ となり、気象予測を用いた路面温度予測の実用性を示すことが出来た。

**第4章 広域路面温度予測モデルの精度改善**では、1)航空レーザ測量データ(LP データ)を用いた広域路面温度予測の高精度化、2)道路気象センサを用いた路面温度予測補正、3)気温長期観測データを用いた気温予報値補正をそれぞれ開発し、路面温度予測精度の改善を試みた。LPデータを用いた広域路面温度予測の高精度化検証では、路線周辺に沿道地物が多く存在する区

間では地形解像度 $\leq 10\text{m}$ とすることが好ましいが、平地では地形解像度が $50\text{m}$ でも正確な路面温度予測が可能であることが分かった。計算時間は要素数のべき乗に比例して長くなり、計算時間を減らすためには形態係数、続いて日向・日陰の計算の改善(高速化)が効果的であることが明らかとなった。

さらに、本研究で提案する道路気象センサを用いた路面温度予測補正方法を用いることで、路線温度の予測精度は昼夜を問わず全ての時間帯で改善されることが示された。

気温長期観測データを用いた気温予報値補正方法の検証では、気象庁メソ数値予報モデル格子点値の気温予報値と実測値を比較し、気温予測誤差を統計的に評価する方法を構築した。その結果、気温予測誤差の傾向を空間的に評価し、気温予測値の補正を行うことが可能となった。また、気温補正方法を SAFF モデルに組み込んだ場合、路線温度の計算精度は平均で  $0.2^{\circ}\text{C}$  向上することが示された。

**第 5 章 結論**では、本研究によって得られた知見を示すとともに SAFF モデルの持つ課題および今後の展望について述べた。

**第 6 章 補遺**では、SAFF モデルの冬期道路管理への適用事例として、福井県永平寺大野道路における凍結危険個所の抽出および兵庫県和田山八鹿道路における融雪システム導入効果の評価の結果を示した。

# 1. 序論

## 1.1 研究の背景

日本は国土面積の約 60%が積雪寒冷地域となっており、年間降雪量が 2m を超える地域に大規模な都市(札幌, 新潟, 金沢など)が複数存在する。また、積雪寒冷地域に指定されている地域以外でも冬期には低温や積雪に起因する事故などが度々発生している。国土の大部分では局所的、あるいは一時的に降雪や低温による交通、農業などへの被害が発生していると推察される(図 1-1 を参照)。

諸外国と比較して、日本国内の積雪寒冷地域では降雪量が多い傾向にある(図 1-2)<sup>1)</sup>。このような地域では積雪深が短時間で大きく変化するため、急な降雪による交通障害の発生がある。近年の例では、2010 年 12 月から 2011 年 2 月にかけて断続的に発生した豪雪により山陰地方、北陸地方および東北地方の国道で多数の車両が立往生する事態となった<sup>1)</sup>。また、2012 年 1 月および 2 月にも福井県、兵庫県、鳥取県および島根県で豪雪による通行止めおよび大規模な渋滞が発生した(図 1-3)。

また、道路網の整備が進むに従い、非積雪

地域から積雪地域への車両進入による交通事故や渋滞の発生件数が増加傾向にある。2011 年 1 月に福井県敦賀市で発生した大規模な交通障害は、冬用タイヤ未装着車による登坂不能が原因であった。この問題を避けるために、積雪地域と非積雪地域を結ぶ道路では冬用タイヤおよびタイヤチェーンの装着確認が行われている。しかしながら、タイヤチェックを全ての路線で実施することは困難であり、冬期道路管理の課題の 1 つとして挙げられている。

このような事態を受け、道路管理者は凍結防止剤散布や除雪の頻度を増加することで冬期道路のサービスレベルの維持を図っている。図 1-3 は日本国内の主要道路における年凍結防止剤散布量の急変化を示しており、散布量は平成 2 年から平成 12 年の 10 年間で 3 倍となり、その後も増加傾向にある。

一方で、我が国における冬期道路の道路維持および管理に係る予算は、毎年削減が続いている。例えば、札幌市では道路延長が伸びているにもかかわらず除雪事業費は減少傾向



図 1-1 日本の豪雪地帯および特別豪雪地帯の分布



図 1-2 国内外の主要都市における気温と降水量の関係(1999 年 1 月)

にある(図 1-5)。また、費用削減のために既存の融雪システムを稼働停止した例も見られる<sup>2)</sup>。

一部の道路管理者は効率的な冬期道路管理の手法を採用し始めている。幹線道路を中心に整備されている道路気象センサ・CCTV による路面状態の監視および降雪時のパトロール車両による巡回に基づいた除雪・凍結防止剤散布タイミングの決定はその一例である。しかしながら、このような手法では広範囲かつ高頻度に亘る監視は人的及び財政的に困難であり、更なる効率化が求められている。

## 1.2 既往の路面温度予測モデル

このような背景から、より効率的な冬期道路管理を行うためのツールとして、路面温度予測モデル(Road Surface Temperature Forecast, RSTF モデル)の開発が様々な研究機関で進められている。RSTF モデルは数時間から 1 日先までの路面温度を予測することで除雪・凍結防止剤散布時期の決定やタイヤチェーン規制および通行止めの実施の判断などに利用されることが期待されている。RSTF モデルは従来からの道路の 1 点を予測対象とする定点 RSTF モデルが主流であるが、最近になって路線全体を予測対象とする広域 RSTF モデルが出てきた(表 1-1 を参照)。以下にその詳細を示す。

### 1.2.1 定点路面温度予測モデル

RSTFモデルは、統計的手法と熱収支法に分類される。統計的手法は予測対象路線中の特定箇所における気象および路面温度データを蓄積し、判別分析法やニューラルネットワークを中心に路面温度予測を行う手法である。代表例としては堀井および福田<sup>3)</sup>、沼田ら<sup>4)</sup>および舟田<sup>5)</sup>による研究が挙げられる。統計的手法はモデルの構築が比較的容易であるが、路面温度や気象データ等を長期に亘り蓄積する必要がある。さらに、車両による日射の遮

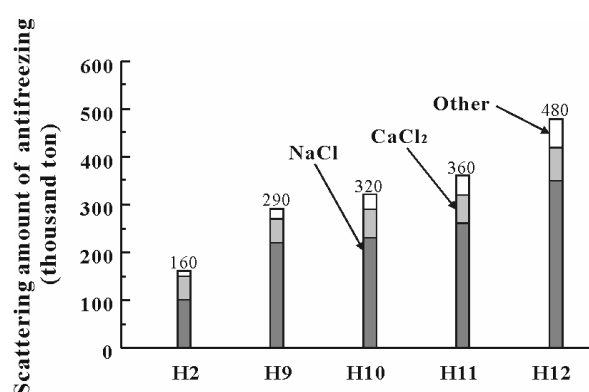


図 1-3 日本の主要道路における凍結防止剤散布量の推移



図 1-4 2011 年 1 月に発生した豪雪による渋滞(国道 8 号, 敦賀市)

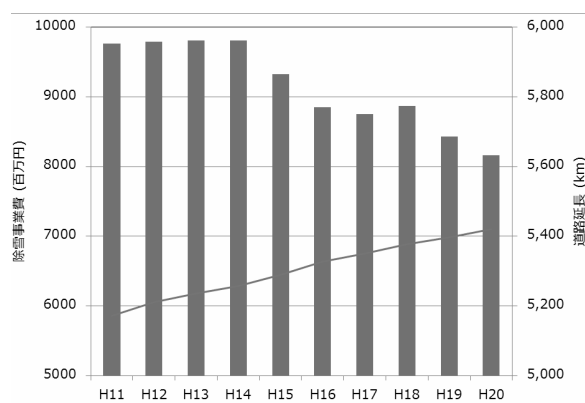


図 1-5 除雪事業費および道路延長の推移(札幌市)

表 1-1 既往の RSTF モデルの比較

予測手法	定点 RSTF モデル		広域 RSTF モデル	
	統計的手法	熱収支法	統計的手法	熱収支法
入力データの入手容易性	説明変数として用いるデータの蓄積が必要	容易	困難	沿道地形形状の撮影が必要
人為的要因の考慮	困難	一部モデルで考慮	困難	一部モデルで考慮
地形の考慮	間接的に考慮	一部モデルで考慮	困難	一部モデルで考慮
予測に要する時間	実用上問題なし	実用上問題なし	実用上問題なし	予測対象路線の距離に依存
道路管理への適用性	可能(狭い範囲)	可能(狭い範囲)	可能性あり	可能性あり

蔽、輻射、顕熱などの様々な次元の影響因子が増えると、路面温度予測に果たす各影響因子からの貢献が定量化し難くなる。

他方、熱収支法は気象および地盤に関連する要因などの熱フラックスを用いて、路面の熱収支を計算することで路面温度を求める手法である。同手法はわが国では高橋ら<sup>6)</sup>、石川ら<sup>7)</sup>、武市<sup>8)</sup>、渡邊および福原<sup>9)</sup>によって、海外では *Shao, J. and Lister, P. J.*<sup>10)</sup> および *Thones, J. E. et al.*<sup>11)</sup> の研究がある。熱収支法は物理的根拠に基づくため計算プロセスが明快である。しかしながら、熱フラックス計算に含まれるパラメータの値は必ずしも定数でないため、その物理的性質を明らかにする必要がある。また、既往の定点 RSTF モデルの殆どは、対象地点の気象観測データが入力されるために、定点 RSTF モデルのアルゴリズムを広域 RSTF モデルに適用しようとすれば、数多くの気象観測を伴うことになり、省力化を図る目的に合致しない。

### 1.2.2 広域路面温度予測モデル

広域RSTFモデルとして須田ら<sup>12)</sup>は統計的手法を、高橋ら<sup>13)</sup>、西村ら<sup>14)</sup>および *Chapman, L and Thornes, J. E.*<sup>15)</sup>は熱収支法をそれぞれ提

案した。広域RSTFでは当然ながら定点RSTFに比べて多くの入力データを必要とする。例えば、須田ら<sup>12)</sup>は21個の説明変数で代表地点の気温を予測し、さらに路線上の任意の地点(全長101.9kmで平均1.4km間隔)の気温を推定した。任意地点と代表地点の温度関係は標高や海岸からの距離といった地形因子で結び付けられた。凍結は推定気温が0℃以下で開始するとしており、路面温度の推定まで至っていない。

一方、熱収支法の中には、路線全体の画像撮影を同一な気象条件下で複数回行って、路線の日向および日陰の空間分布を考慮したモデル<sup>13), 15)</sup>がある。いずれにせよ、太陽の高度や方位角が時々刻々と変化するために、こうした手法を用いて路面温度分布を求めようとすると、精度面のみならず計算前の準備で多くの労力と時間を要し、現実的でない。その中で、地形と太陽の位置から日向および日陰を判別し、山岳融雪を計算した *Bartelt, P. and Lehning, M.*の研究<sup>16)</sup>は注目に値する。しかしながら、道路に対して考慮されるべき交通条件・車両熱の影響は含まれておらず、散乱日射および地形からの長波放射の輻射が考慮されているか否かは不明である。



また、広域RSTFモデルと類似性の高い梅干野らの研究<sup>17)</sup>では、メッシュサイズ0.4mとして解析領域2haの路面および建築物表面の温度予測に16時間を要した。冬期道路管理の面からは、現在の気象データを基に1～3時間先のRSTFが出力できる処理アルゴリズムが必要となる。

このように、計算の高速化と交通状態および道路周辺の山岳地形の熱的影響を加味したRSTFモデルは、筆者らの知る限り世界にない。

### 1.3 研究の目的

本研究では、既往のRSTFモデルの課題である汎用性、予測精度および計算時間を改善し、実際の冬期道路管理に利用可能なRSTFモデルを構築する。そのために、

- (1) デジタル標高モデル(DSM)による山岳地形が路面に及ぼす熱的影響を短時間で計算する手法を提案し、それを組み込んだ熱収支法による広域RSTFモデルを構築する、
- (2) 路面に入射する日射フラックス、長波放射フラックスおよび路面温度の路線分布について計測値と計算値を比較し、モデルの精度および計算時間の短縮効果を検証する、
- (3) 路線温度および日射フラックスの計算結果とサーマルマッピングの結果を比較し、DSMの解像度が計算精度と計算時間に及ぼす影響を明らかにする、
- (4) 道路気象センサやアメダス計測データなど既存設備を活用し、路面温度予測精度を改善するモデルを構築する、
- (5) (1)から(4)で構築したRSTFモデルを実際の冬期道路管理に適用することを目的とする。

### 1.4 本論文の構成

本論文は図 1-6 に示すように5つの章および補遺から構成される。以下に各章の概説を

示す。

第1章では、現在の冬期道路管理の現状および問題点を挙げ、より効率的な冬期道路管理を実現するために広域 RSTF モデルが必要であることを述べた。

第2章では、広域 RSTF モデルを構築する上で必要不可欠となる、沿道地物の影響を考慮した気象条件分布を予測する広域気象モデルを開発する。また、サーマルマッピングにより得られた実測値と予測値を比較することで広域気象モデルの予測精度検証を行う。

第3章では、第2章で構築した広域気象モデルに熱収支法による路面温度予測モデルを組み込んだ新しい広域路面温度予測モデル(以下、SAFF モデルと呼称)を示す。同時に、既存の熱収支法による広域 RSTF モデルにおいて問題とされていた計算時間の高速化を試みる。さらに、兵庫県春日和田山道路において短期集中観測および長期観測を行い、得られた実測値と SAFF モデルによる予測値を比較し SAFF モデルの精度および問題点を検証する。

第4章では、SAFF モデルの予測精度を改善するために道路気象センサによるリアルタイム計測データやアメダス計測データを用いた予測補正方法を提案する。また、従来広く用いられていた解像度50mのDSMに替わり、より解像度が高い航空レーザ測量データ(LPデータ)を用いた路面温度予測を行い、地形解像度と路面温度予測精度の関係を明らかにする。

第5章では、第1章から第4章で得られた結果を総括し、今後の展望および課題について述べる。

補遺では、SAFF モデルの冬期道路管理への適用例として、路面温度予測結果に基づいた兵庫県北近畿豊岡自動車道における冬期の危険箇所抽出結果および融雪システムの導入効果の予測結果について述べる。

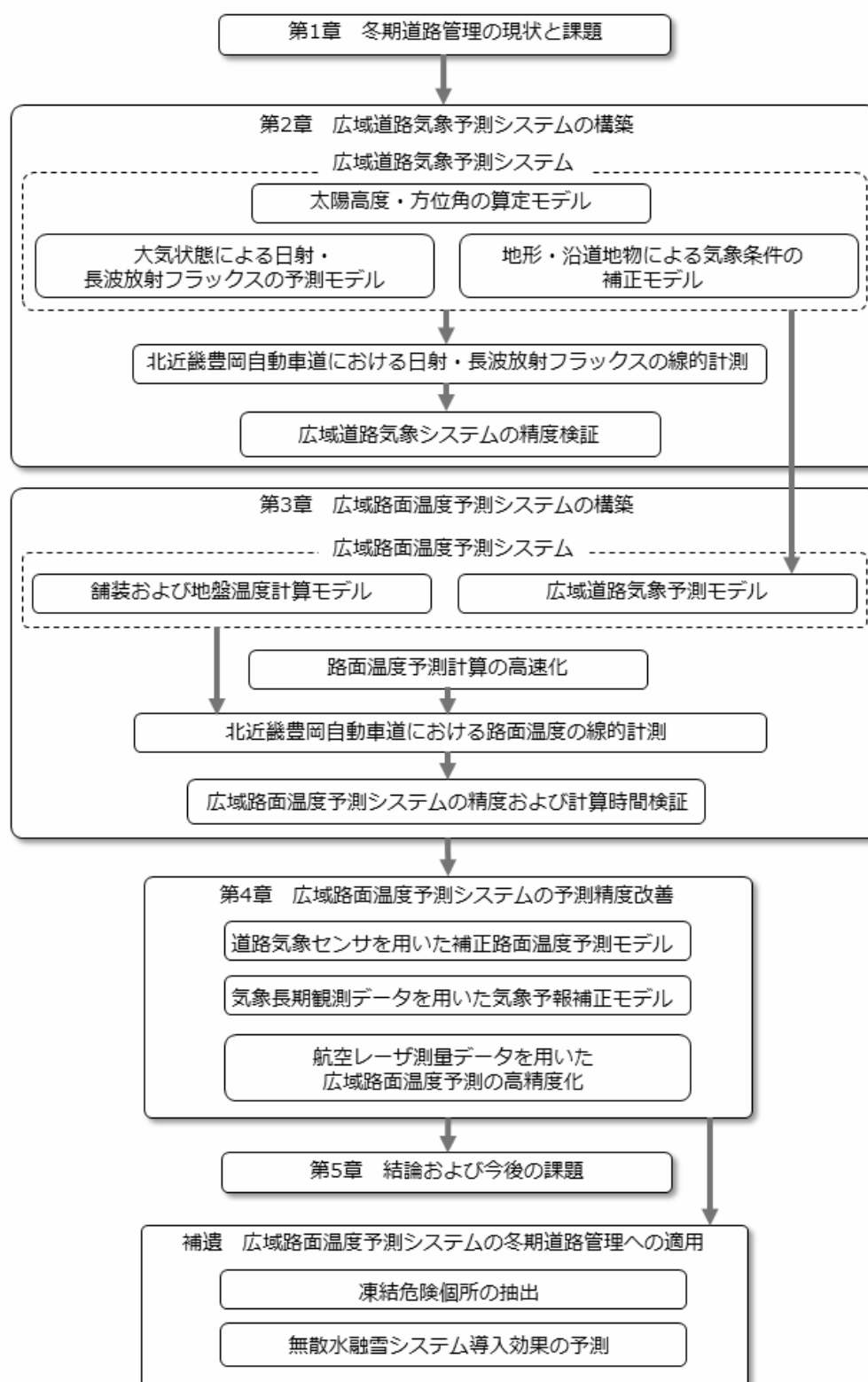


図 1-6 本論文の構成および研究の流れ

## 参考文献

- 1) 蓑和保男, 上石勲: 道路管理者の視点から～近冬の話～ ―登坂不能車の実態と対応―, 雪氷研究大会講演要旨集, pp.65, 2011.
- 2) 札幌市雪対策基本計画検討委員会: ロードヒーティング停止に係る安全性の検討について, 2007.
- 3) 堀井雅史, 福田正: 舗装路面凍結システムの構築, 土木学会論文集, Vol. 50, No. 669, pp. 243-251, 2001.
- 4) 沼田実, 伊藤驍, 岩浪守, 河村容輔, 岡本純, 田代享, 後藤律子: 短期路面凍結予測に関する新しい手法の研究, 寒地技術論文・報告集, Vol. 19, pp. 147-151, 2003.
- 5) 舟田久之: 道路凍結と降雪の予測, 地学雑誌, Vol. 101, No. 6, pp. 491-505, 1992.
- 6) 高橋尚人, 浅野基樹, 石川信敬: 沿道構造物の影響を考慮した路面温度推定モデルの構築について, 寒地技術論文・報告集, Vol. 22, pp. 153-158, 2006.
- 7) 石川信敬, 成瀬廉二, 前野紀一: 道路雪氷の熱収支特性, 低温科学, Vol. 46, pp. 151-161, 1987.
- 8) 武市靖: 路面凍結の予測に関する研究, 土木学会論文集, No. 470/IV-20, pp. 175-184, 1993.
- 9) 渡邊洋, 福原輝幸: 橋梁道路と待機との間の熱・水分輸送と路面凍結現象, 水工学論文集, Vol. 39, pp. 183-188, 1995.
- 10) Shao, J. and Lister, P. J. :An automated Forecasting model of road surface temperature and state for winter road, maintenance, *Journal of applied meteorology*, Vol. 35, pp. 1352-1361, 1996.
- 11) Thornes, J. E. , Cavan, G. and Chapman, L. : The use of GIS and IceMiser to predict winter road surface temperatures in Poland, *12<sup>th</sup> International Road Weather Conference*, 2004
- 12) 須田公男, 水嶋正二, 赤川正臣: 一般国道 8 号, 17 号の路面凍結予測について, 日本雪氷学会誌, Vol. 50, No. 3, pp. 155-163, 1988.
- 13) 高橋尚人, 徳永ロベルト, 浅野基樹, 石川信敬, 林華奈子: 我が国の冬期道路管理に適した MDSS (Maintenance Decision Support System)の構築と運用, 寒地技術論文・報告集, Vol. 23, pp. 307-312, 2007.
- 14) 西村浩一, 平島寛行, 小杉健二, 小林俊市, 佐藤威, 佐藤篤司: 道路雪氷の広域予測に関する研究 I, 寒地技術論文・報告集, Vol. 20, pp. 122-127, 2004.
- 15) Chapman, L. and Thones, J. E. :A blueprint for 21<sup>st</sup> century road ice prediction, *11<sup>th</sup> International Road Winter Conference*, 2002.
- 16) Bartelt, P. and Lehning, M. :A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning Part I: numerical model, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 35, pp. 123-145, 2002.
- 17) 梅干野晃, 浅輪貴史, 中大窪千晶: 3D-CAD と屋外熱環境シミュレーションを一体化した環境設計ツール, 日本建築学会技術報告集, Vol. 20, pp. 195-198, 2004.

## 2. デジタル標高データを用いた広域気象算定法

### 2.1 はじめに

広域路面温度予測モデル(以下、広域 RSTF モデル)では、気温や日射フラックスなどの気象条件を面的に求めることが必要不可欠である。本章では、地形や道路周辺の構造物(沿道地物)による影響を考慮して気象条件を面的に算定する方法について述べる。

既往の研究では、気象条件のうち日射および長波放射フラックスが路面温度に与える影響は特に大きいことが示されている<sup>1)</sup>。従って、これらを正確に予測することは路面温度を精度よく予測する上で重要となる。

日射および長波放射フラックスは、1)太陽の高度や方位角などによる天文学的要因、2)雲による日射の遮蔽および散乱などによる気象学的要因、3)予測対象位置の標高、沿道地物による日射遮蔽や輻射といった地形的要因の3つに大きく影響される(図 2-1)。

これまでに開発された RSTF モデルでは、Mahoney, W.P. ら<sup>2)</sup>はメソスケール気象予測モ

デルによる予測結果を気象条件としてそのまま RSTF モデルに与える手法を採っている。これは路面温度予測対象地域が極めて平坦であり、沿道地物による路線にのみ効果的な方法である。

一方で、都市部や山岳地帯など複雑で変化が大きい地形を通る路線を対象とする場合は、地形的要因の考慮が必要不可欠である。例えば、高橋ら<sup>1)</sup>、丸山ら<sup>3)</sup>および Chapman, L and Thornes, J. E.<sup>4)</sup>による研究では、天文学的要因と気象学的要因に加え、魚眼カメラによる沿道地物の撮影を複数回行うことで地形による日射遮蔽を考慮している。しかしながら、この手法では沿道地物の撮影に労力を要する上、沿道地物による輻射および日射反射を考慮することは難しいという欠点がある。

そこで、本章ではこれらの問題点を解決するために、デジタル標高データ(DSM)および数値予報データを用いて、より高精度な広域気象条件を算定する方法を示す。

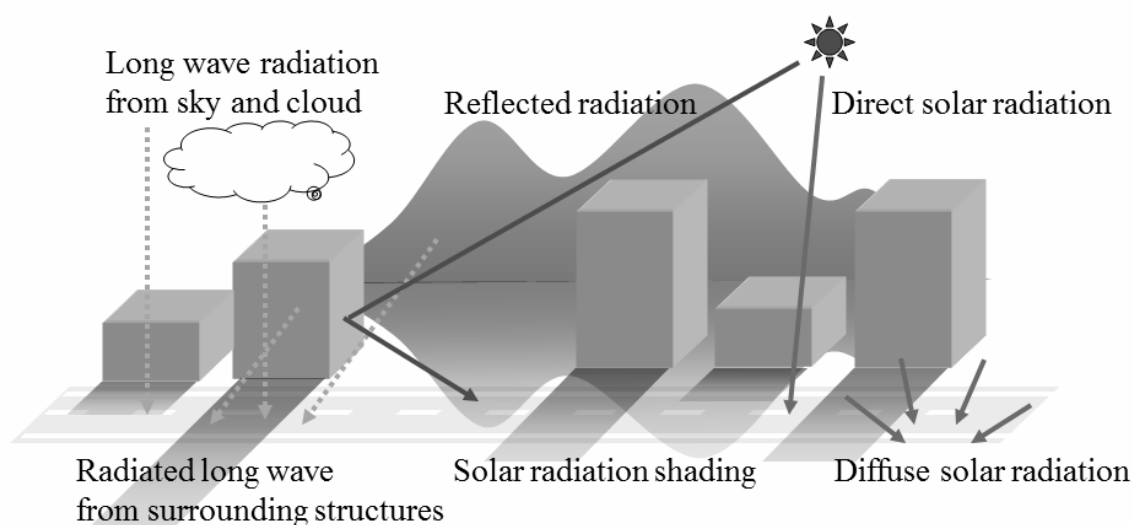


図 2-1 気象条件の分布に影響する要因

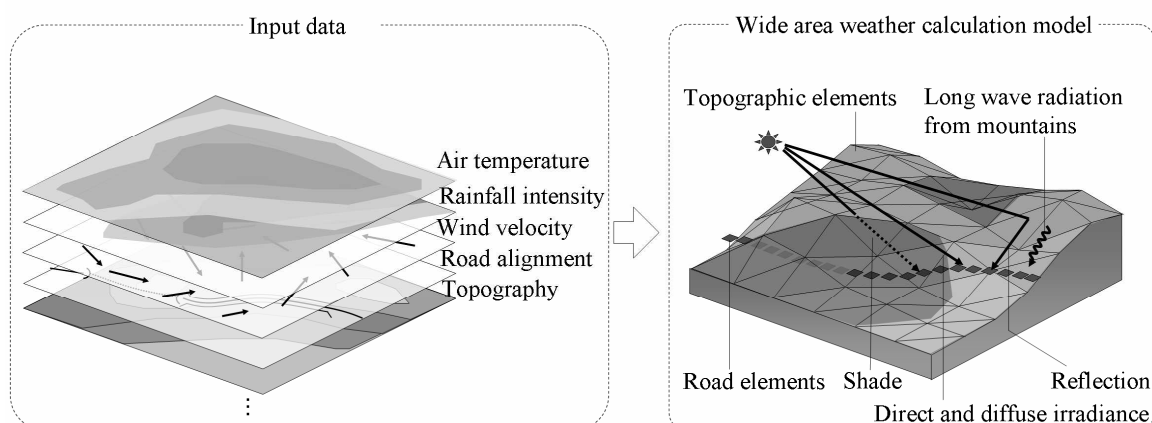


図 2-2 広域気象算定の概要

## 2.2 広域気象算定方法

図 2-2 に広域気象算定の概要を示す。気象の算定は、太陽の高度および方位角の算定、沿道地物による日射遮蔽、輻射および日射反射の影響の算定および雲量および雲高から地表面に到達する日射量の補正の 3 つから構成される。以下にその詳細を示す。

## 2.3 太陽高度および方位角の算定

地形による日射遮蔽や輻射、反射といった影響を考慮するためには太陽高度  $h$  および方位角  $A$  を正確に求める必要がある。 $h$  および  $A$  はそれぞれ以下の式で求められる。

$$\sin h = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos t \quad (2-1)$$

$$\tan A = \frac{-\cos \delta \sin t}{\sin \delta \sin \phi - \cos \delta \sin \phi \cos t} \quad (2-2)$$

ここに、

$\delta$ : 太陽の赤緯  $(^\circ)$

$\phi$ : 対象地点の緯度  $(^\circ)$

$t$ : 太陽の時角  $(^\circ)$

である。

$\delta$  は以下の式で表される。

$$\sin \delta = \sin \Lambda_s \cos e \quad (2-3)$$

ここに、

$\Lambda_s$ : 太陽の黄経  $(^\circ)$

$e$ : 黄道傾斜角  $(^\circ)$

である。

$\Lambda_s$  は長沢による式<sup>5)</sup>によって与えられる。

$$\begin{aligned} \Lambda_s = & 280.4603 + 360.007697T \\ & + (1.9146 - 0.00005T) \\ & \times \sin(357.538 + 359.991T) \\ & + 0.0200 \sin(355.05 + 719.981T) \\ & + 0.0048 \sin(234.95 + 19.341T) \\ & + 0.0020 \sin(247.10 + 329.640T) \\ & + 0.0018 \sin(297.80 + 4452.670T) \\ & + 0.0018 \sin(251.30 + 0.200T) \\ & + 0.0015 \sin(343.20 + 450.37T) \\ & + 0.0013 \sin(81.40 + 225.18T) \\ & + 0.0008 \sin(132.50 + 659.29T) \\ & + 0.0007 \sin(153.30 + 90.38T) \\ & + 0.0007 \sin(206.80 + 30.35T) \\ & + 0.0006 \sin(29.80 + 337.18T) \\ & + 0.0005 \sin(207.40 + 1.50T) \\ & + 0.0005 \sin(291.20 + 22.81T) \\ & + 0.0004 \sin(234.90 + 315.56T) \end{aligned}$$

## 2. デジタル標高データを用いた広域気象算定法

$$\begin{aligned}
 &+ 0.0004 \sin(157.30 + 299.30T) \\
 &+ 0.0004 \sin(21.10 + 720.02T) \\
 &+ 0.0003 \sin(352.50 + 1079.97T) \\
 &+ 0.0003 \sin(329.70 + 44.43T)
 \end{aligned} \quad (2-4)$$

ここに,

$T$ : 時刻変数 (-)  
である.

$T$ は2000年1月1日正午からの経過日数を  $K$  としたとき, 以下の式で与えられる.

$$T = K/365.25 \quad (2-5)$$

$t$  は次式で与えられる.

$$t = \Theta - \alpha \quad (2-6)$$

ここに,

$\Theta$ : 恒星時 (-)

$\alpha$ : 太陽の赤経 (°)

である.

$\Theta$ は次式で与えられる.

$$\begin{aligned}
 \Theta = &325.4606 + 360.00770536T + \\
 &3.879 \times 10^{-8} T^2 + 360(s_d/86400) + \Lambda
 \end{aligned} \quad (2-7)$$

ここに,

$s_d$ : 1日の経過時間 (sec)

$\Lambda$ : 対象地点の東経 (°)

である.

$\alpha$ は以下の式で表される.

$$\tan \alpha = \tan \lambda_s \cos e \quad (2-8)$$

地表付近では, 大気による屈折のため  $h$  は式(2-1)から式(2-8)で求めた値よりも大きくなる傾向にある. 大気による屈折を考慮した太陽高度  $h'$  は次式で与えられる.

$$h' = h + R \quad (2-9)$$

$$R = \frac{0.0167}{\tan(h + 8.6/(h + 4.4))} \quad (2-10)$$

### 2.4 雲高および雲量による日射フラックスおよび長波放射フラックスの補正

平坦な地表面に到達する日射フラックスおよび長波放射フラックスは大気透過率, 雲量および雲高といった大気の状態や,  $h$  および  $A$  のような太陽の位置によって大きく変化する. そのため, これら両フラックスを精度よく評価することは路面温度の精度の良し悪しに直結する. 本項では様々な気象条件下において適用可能な日射フラックスおよび長波放射フラックスの算定手法について述べる.

#### 2.4.1 快晴時における直達日射フラックスおよび散乱日射フラックス

快晴時の地表面における日射フラックス  $q_{sd0f}$  は直達日射フラックス  $q_{sdrf}$  と散乱日射フラックス  $q_{sdif}$  の和として与えられる.  $q_{sdrf}$  は *Bouguer* の式を用いて,  $q_{sdif}$  は *Berlage* の式を用いてそれぞれ与えられる.

$$q_{sdrf} = Jp^{\frac{1}{\sinh}} \quad (2-11)$$

$$q_{sdif} = 0.5J \sinh \frac{1 - p^{\frac{1}{\sinh}}}{1 - 1.4 \ln p} \quad (2-12)$$

ここに,

$J$  : 太陽定数 (W/m<sup>2</sup>)

$p$  : 大気透過率 (-)

である.

#### 2.4.2 雲がある場合の直達日射フラックスおよび散乱日射フラックス

雲がある場合の日射フラックス  $q_{sd0c}$  は近藤による式<sup>6)</sup>を用いて以下のように表される.

$$q_{sd0c} = yq_{sd0f} \quad (2-13)$$

## 2. デジタル標高データを用いた広域気象算定法

$$y = \begin{cases} 1.70 \log_{10}(1.22 - 1.02x) \\ + 0.521x + 0.846 & (C_{all} \geq 0.3) \\ 1 & (C_{all} < 0.3) \end{cases} \quad (2-14)$$

$$x = C_{all} - 0.4 \exp(-3C_l) \quad (2-15)$$

ここに,

$C_{all}$  : 全雲量 (-)

$C_l$  : 下層雲量 (-)

である.

雲がある場合の直達日射フラックス  $q_{sdrc}$  と散乱日射フラックス  $q_{sdfc}$  に関しては, *Bouguer*の式および*Berlage*の式は曇天時に誤差が大きくなることが報告されている<sup>7)</sup>. そこで, 本モデルでは宇田川らによる直散分離の式<sup>7)</sup>を用いて,  $q_{sdrc}$  および  $q_{sdfc}$  を求める.

$$q_{sdrc} = q_{sd0c} p_{dir} \quad (2-16)$$

$$q_{sdfc} = q_{sd0c} (1 - p_{dif}) \quad (2-17)$$

ここに,

$p_{dir}$  : 直達日射フラックスが全天日射フラックスに占める割合 (-)

である.  $p_{dir}$  は正規化した日射フラックス  $K_t$  により異なり, 以下の式で与えられる.

$$p_{dir} = -0.43 + 1.43K_t \quad (K_t \geq K_{tc}) \quad (2-18)$$

$$p_{dir} = (2.277 - 1.258 \sinh + 0.2396 \sin^2 h) K_t^3 \quad (K_t < K_{tc}) \quad (2-19)$$

$K_t$  は以下の式で表される.

$$K_t = \frac{q_{sd0c}}{J \sinh} \quad (2-20)$$

また, 式(2-18)および式(2-19)で用いる判別係数  $K_{tc}$  は以下の式で表される.

$$K_{tc} = 0.5163 + 0.333 \sinh + 0.00803 \sin^2 h \quad (2-21)$$

### 2.4.3 快晴時における長波放射フラックス

快晴時における天空長波放射フラックス  $q_{ldf}$  は, Brunt の式で与えられる.

$$q_{ldf} = \sigma T_a^4 (0.526 + 0.076 \sqrt{H}) \quad (2-22)$$

ここに,

$\sigma$  : Stefan-Boltzmann 定数 ( $W/m^2 K^4$ )

$T_a$  : 地表付近の空気の絶対温度 (K)

$H$  : 地表付近の空気の水蒸気分圧 (mmHg)

である.

### 2.4.4 雲がある場合の長波放射フラックス

快晴時以外, 地表面付近に到達する天空長波放射フラックス  $q_{ldc}$  は雲から放射される長波放射フラックスと晴天部から放射される長波放射フラックスの和として与えられる. すなわち,

$$\begin{aligned} q_{ldc} = & C_l \sigma T_{cl}^4 \\ & + (1 - C_l) C_m \sigma T_{cm}^4 \\ & + (1 - C_l)(1 - C_m) \sigma T_{ch}^4 \\ & + (1 - C_l)(1 - C_m)(1 - C_h) q_{ld0f} \end{aligned} \quad (2-23)$$

ここに,

$C_m$  : 中層雲量 (-)

$C_h$  : 高層雲量 (-)

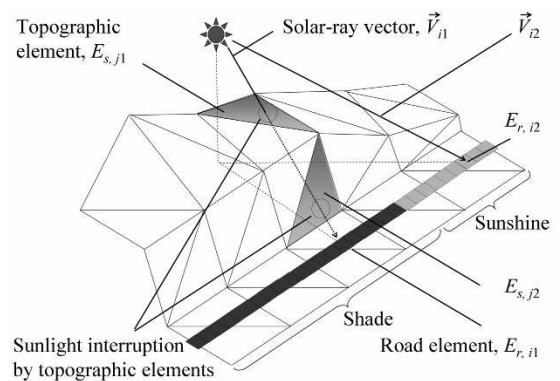


図 2-3 日射遮蔽の判別例

## 2. デジタル標高データを用いた広域気象算定法

### 2.5 沿道地形が道路気象に与える影響

#### 2.5.1 沿道地形を考慮した日射フラックスの算定方法

沿道地形による日射遮蔽は2.1で述べたように、昼間の路面温度変化に大きな影響を及ぼす。本手法では、地形はDSMの格子点標高データを基に構成される三角形面要素(地形面要素)の集合体として表現される。路線は矩形道路面要素の集合体で構成され、道路面要素の温度は要素重心で代表させる。

日射遮蔽の有無は、道路面要素から太陽に向かう日射ベクトル $\vec{V}$ と道路面要素の位置から判別する。例えば、図2-3に示すように要素番号 $i1$ の道路面要素 $E_{r, i1}$ に向かう $\vec{V}$ を $\vec{V}_{i1}$ とすれば、 $\vec{V}_{i1}$ は地形面要素 $E_{s, j1}$ および $E_{s, j2}$ と交差しており、日射遮蔽が生じたと判別する。他方、 $E_{r, i2}$ に向かう $\vec{V}$ 、 $\vec{V}_{i2}$ は地形面要素と交差しないので、 $E_{r, i2}$ は日向であると判別される。

道路面要素 $E_r$ へ入射する日射フラックス $q_{sd}$ は式(2-24)のごとく、直達日射、散乱日射および山岳からの反射日射の和で与えられる。

$$q_{sd} = S q_{sdr} \cos \theta + (1 - f_{all}) q_{sdf} + q_{sr} \quad (2-24)$$

ここに、

$S$  : 直達日射遮蔽の判別値 (-)

$q_{sdr}$  :  $E_r$  への直達日射フラックス ( $\text{W/m}^2$ )

$\theta$  :  $E_r$  の重心から太陽へ向かうベクトル $\vec{V}$ と $E_r$ の法線ベクトルのなす角 ( $^\circ$ )

$f_{all}$  :  $E_r$  から全地形面要素への形態係数 (-)

$q_{sdf}$  :  $E_r$  への散乱日射フラックス ( $\text{W/m}^2$ )

$q_{sr}$  :  $E_r$  に到達する山岳からの反射日射フラックス ( $\text{W/m}^2$ )

である。 $\vec{V}$ は2.3で述べた $h$ および $A$ より求める。

まず、式(2-24)の右辺第1項について述べる。 $S$ は日射遮蔽の判別係数であり、 $E_r$ へ入射する直達日射が遮蔽されている場合に0、遮蔽されていない場合に1となる。

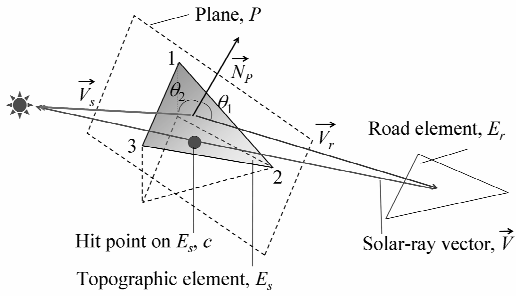


図 2-4 地形面要素を含む平面と日射ベクトルの交差判別

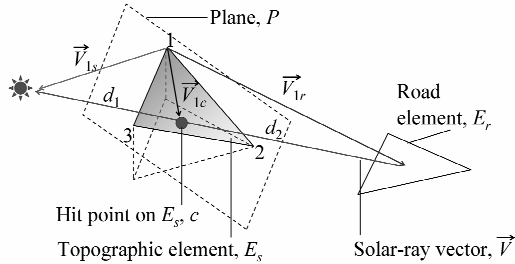


図 2-5 地形面要素を含む平面と日射ベクトルの交点位置の計算方法

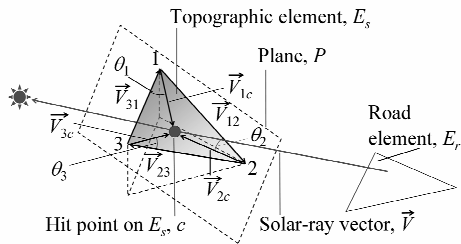


図 2-6 内包判別の方法

$T_{cl}$  : 低層雲の雲底絶対温度 (K)

$T_{cm}$  : 中層雲の雲底絶対温度 (K)

$T_{ch}$  : 高層雲の雲底絶対温度 (K)

である。



図 2-5は $E_r$ に対する $S$ の値(0または1)の判別方法を示す。 $\vec{V}$ が地形面要素 $E_s$ を含む平面 $P$ と交差し、その交点 $c$ が $E_s$ の内側に存在する場合は $S=0$ となる。具体的な判別手順を以下に述べる。平面 $P$ の法線ベクトル $\vec{N}_p$ と $E_s$ の重心から $E_r$ に向かうベクトル $\vec{V}_r$ の内積、および $\vec{N}_p$ と $E_s$ の重心から太陽に向かうベクトル $\vec{V}_s$ の内積をそれぞれ求める。次に、これら2つの内積の積 $D$ を式(2-25)で計算する。

$$D = \left| \vec{N}_p \right| \left| \vec{V}_r \right| \cos \theta_1 \cdot \left| \vec{N}_p \right| \left| \vec{V}_s \right| \cos \theta_2 \quad (2-25)$$

ここに、

$\theta_1$  :  $\vec{N}_p$  と  $\vec{V}_r$  のなす角 (°)

$\theta_2$  :  $\vec{N}_p$  と  $\vec{V}_s$  のなす角 (°)

である。 $D \geq 0$  のとき平面  $P$  と  $\vec{V}$  が交差したと判別する。

平面 $P$ と $\vec{V}$ の交差が確認されると、 $c$ が $E_s$ の内側に存在するかどうか調べる。そのためには、 $E_s$ の各頂点から $c$ に向かうベクトルを求める必要がある。例えば、図 2-4に示すように $E_s$ の頂点1から $c$ に向かうベクトル $\vec{V}_{1c}$ は式(2-26)で求められる。

$$\vec{V}_{1c} = \xi \vec{V}_{1r} + (1 - \xi) \vec{V}_{1s} \quad (2-26)$$

ここに、

$\vec{V}_{1r}$  : 頂点1から $E_r$ に向かうベクトル

$\vec{V}_{1s}$  : 頂点1から太陽に向かうベクトル

$\xi$  :  $\vec{V}$ の $c$ での内分比

である。 $\xi$ は式(2-27)で定義される。

$$\xi = \frac{d_1}{d_1 + d_2} \quad (2-27)$$

ここに、

$d_1$  :  $c$  から太陽までの距離 (m)

$d_2$  :  $c$  から  $E_r$  の重心までの距離(m)

である。 $E_s$ の頂点2および3から $c$ に向かうベクトル $\vec{V}_{2c}$ 、および $\vec{V}_{3c}$ も $\vec{V}_{1c}$ と同じ手順で求められる。

また、 $E_s$ の頂点間を結ぶベクトル( $\vec{V}_{12}$ ,  $\vec{V}_{23}$  および  $\vec{V}_{31}$ )も求める必要がある。

こうして、 $c$  が  $E_s$  の内側にあるかどうかは図 2-6 に示すように、 $\vec{V}_{12}$  と  $\vec{V}_{1c}$ ,  $\vec{V}_{23}$  と  $\vec{V}_{2c}$  および  $\vec{V}_{31}$  と  $\vec{V}_{3c}$  の外積の値が全て同符号であれば、 $c$  は  $E_s$  の内側に存在する。

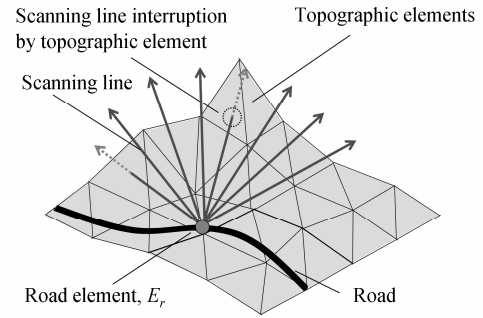


図 2-7 形態係数 $f_{ij}$ の計算例

式(2-24)の右辺第1項中の $q_{sdr}$ は式(2-28)で与えられる。

$$q_{sdr} = \frac{(1 - p_{dif}) q_{sd0}}{\sin \theta_s} \quad (2-28)$$

ここに、

$q_{sd0}$  : 沿道地物がない場合に  $E_r$  に到達する全天日射フラックス( $\text{W/m}^2$ )

$p_{dif}$  :  $q_{sd0}$  に占める天空散乱日射フラックスの比率(-)

である。

次に、式(2-24)の右辺第2項について述べる。地形面要素の数を  $n$  とすれば、 $f_{all}$  は式(2-29)で与えられる。

$$f_{all} = \sum_{j=1}^n f_{ij} \quad (2-29)$$

ここに、

$f_{ij}$  : 要素番号  $i$  の  $E_r$  から全方位角および全仰角に向けて走査線を伸ばし(図 2-7を参照)、要素番号  $j$  の  $E_s$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ )と最初に交差する走査線の本数 $N_j$ と全走査線本数 $N_{all}$ の比である。すなわち、

$$f_{ij} = \frac{N_j}{N_{all}} \quad (2-30)$$

$N_j$ をカウントするための交差判別は、 $E_s$  と  $\vec{V}$  のそれと同様の手順で行われる。

$q_{sdf}$  は式(2-31)で与えられる。

$$q_{sdf} = p_{dif} q_{sd0} \quad (2-31)$$

## 2. デジタル標高データを用いた広域気象算定法

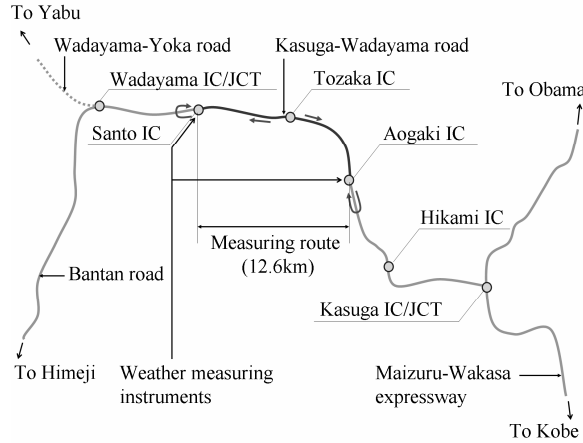


図 2-8 野外観測の概要

最後に、式(2-24)の右辺第3項について述べる。反射日射フラックスは、 $E_s$ に入射した日射が反射して $E_r$ に入射するフラックスと、地形面要素間の多重日射反射の後に $E_s$ に入射した日射が反射して $E_r$ に入射するフラックスの和として与えられる。ただし、後者の計算は長時間を要するので、本論文では考慮しない。この時、 $q_{sr}$ は式(2-32)で与えられる。

$$q_{sr} = \sum_{j=1}^n \{ al_j f_{ij} (q_{sd,j} \cos \theta_{sn} + q_{sdf}) \} \quad (2-32)$$

ここに、

- $al_j$  : 要素番号  $j$  の  $E_s$  のアルベド
  - $q_{sd,j}$  : 要素番号  $j$  の  $E_s$  の周辺に遮蔽物がない場合に到達する全天日射フラックス ( $W/m^2$ )
  - $\theta_{sn}$  : 太陽と  $E_s$  の重心を結ぶ線分と  $E_s$  の法線ベクトルのなす角
- である。

### 2.5.2 沿道地形による影響を考慮した長波放射フラックスの予測理論

$E_r$ に入射する長波放射フラックス  $q_{ld}$  は、大気から入射する長波放射フラックスと地形面要素からの輻射フラックスの和とする。地形面要素間の長波放射を繰り返した後に入射する長波放射フラックスは計算量を増加させ

ることから、本論文では考慮しない。 $q_{ld}$ は式(2-33)で与えられる。

$$q_{ld} = (1 - f_{all}) q_{ld0} + q_{ls} \quad (2-33)$$

ここに、

- $q_{ld0}$  : 遮蔽物がない場合に  $E_r$  に入射する天空長波放射フラックス ( $W/m^2$ )
- $q_{ls}$  : 沿道地形からの  $E_r$  への輻射フラックス ( $W/m^2$ )

である。

要素番号  $i$  の  $E_r$  へ入射する  $q_{ls}$  は次式で与えられる。

$$q_{ls} = \sum_{j=1}^n f_{ij} \{ \epsilon_j s (T_{s,j} + 273.15)^4 \} \quad (2-34)$$

ここに、

- $\epsilon_j$  : 要素番号  $j$  の  $E_s$  の射出率(-)
  - $T_{s,j}$  : 要素番号  $j$  の  $E_s$  の表面温度( $^{\circ}C$ )
- である。

## 2.6 広域気象算定法の精度検証

広域気象算定法の予測精度を検証するために、兵庫県北近畿豊岡自動車道において日射および長波放射フラックスの線的計測を行い、得られた実測値と予測値を比較した。以下に詳細を示す。

### 2.6.1 実験概要

#### (a) 定点気象観測

道路気象観測は日射フラックスの路線変化が明瞭になりやすい、換言すれば広域気象モデルの精度検証がやり易い晴天日を狙って、2010年11月10日15:00から48時間に亘り行った。同時に、山東ICおよび青垣ICに気象ステーションを設置した(図2-8)。気象ステーションでの測定内容は以下の通りである。 $q_{sd}$ および $q_{ld}$ は地上1.0mに設置された放射収支計(Kipp&Zonen 製 CNR 1)により、 $T_a$ および相対湿度  $RH_a$ は地上1.0mに設置された温湿度計(Vaisala 製 HMP 45A)により、 $V_w$ は地上1.5mに設置された三杯式

## 2. デジタル標高データを用いた広域気象算定法

風速計(Davis 製 *wizard III*)により, それぞれ計測した. 山東 IC ではシャドウブレードと全天日射計(Kipp&Zonen 製 *CMP 3*)を用いて,  $q_{sddif}$  を 1 分毎に計測した(図 2-9).

(b) 日射および長波放射フラックスの線の計測

放射収支計(Kipp&Zonen 製 *CPR-PCM-01L*)を搭載した車両(線の計測車両)で対象路線を走行し,  $q_{sd}$  および  $q_{ld}$  の空間分布を約 2m 間隔で計測した. 放射収支計は車両上部(地上 2.0m)に設置した(図 2-10). この線の計測は測定期間中, 3 時間毎に行われた.

(c) 計算に用いた諸条件

(a)および(b)と同時に, 広域気象モデルを用いて日射および長波放射フラックスの予測を行った.  $C_l$ ,  $C_m$ ,  $C_h$ および  $C_{all}$  の分布は気象庁が 2010 年 11 月 10 日 15:00 および 11 月 11 日 15:00 に発表したメソ数値予報モデル格子点値を用いた. また,  $T_{cl}$ ,  $T_{cm}$  および  $T_{ch}$  はそれぞれ地表面, 850hPa 等圧面および 500hPa 等圧面における気温予報格子点値を用いた.  $p$  は実験地から最も近い米子において計測された値(=0.75)を用いた<sup>7)</sup>. また, 水蒸気分圧  $H$  は *Tetens* の式を用いて与えた. すなわち,

$$H = 0.750 p_h \quad (2-35)$$

$$p_h = p_{hsat} RH_a \quad (2-36)$$

$$p_{hsat} = 6.11 \times 10^{\frac{7.5T_a}{T_a + 237.3}} \quad (2-37)$$

ここに,

$p_k$  : 大気の水蒸気圧 (hPa)

$p_{ksat}$  : 大気の飽和水蒸気圧 (hPa)

$RH_a$  : 大気の相対湿度 (-)

である.

本実験では, DSM として国土地理院が発行する 50m メッシュ数値標高地図を用いた.

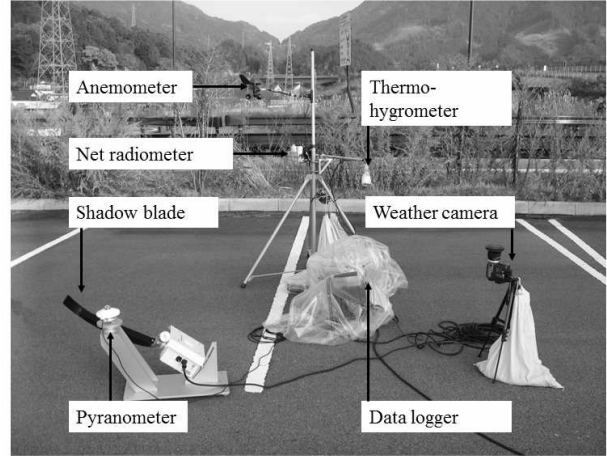


図 2-9 定点気象観測ステーション

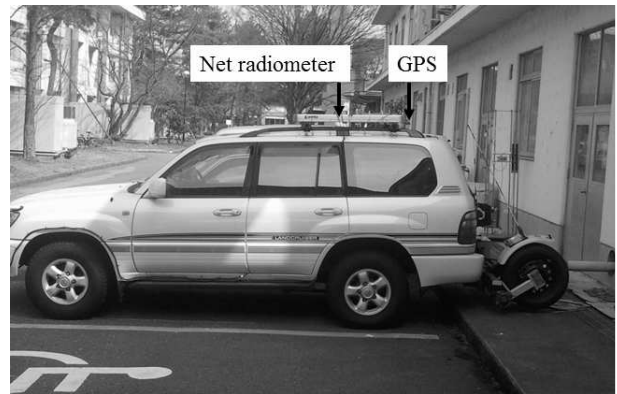


図 2-10 線の計測車両

## 2. デジタル標高データを用いた広域気象算定法

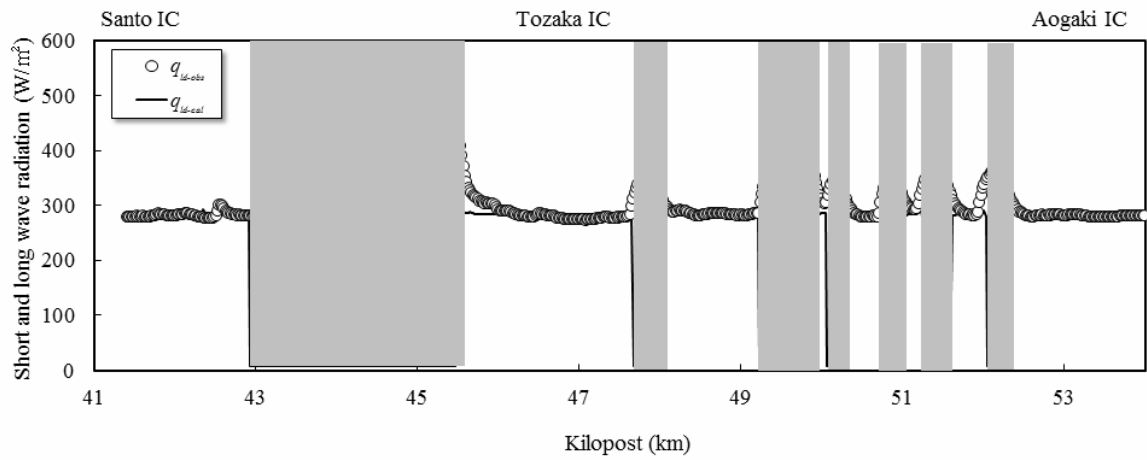


図 2-11 2010 年 11 月 10 日 18 : 00 における長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

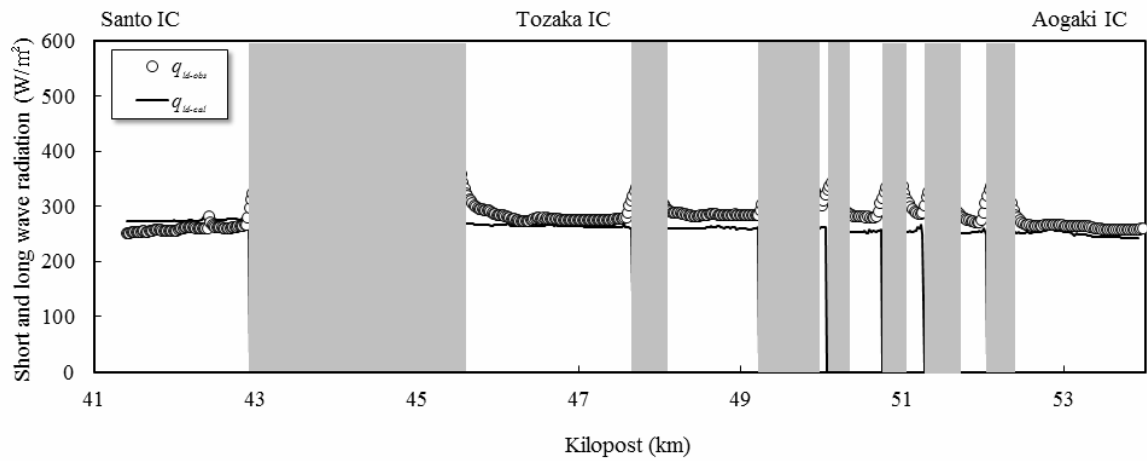


図 2-12 2010 年 11 月 10 日 21 : 00 における長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

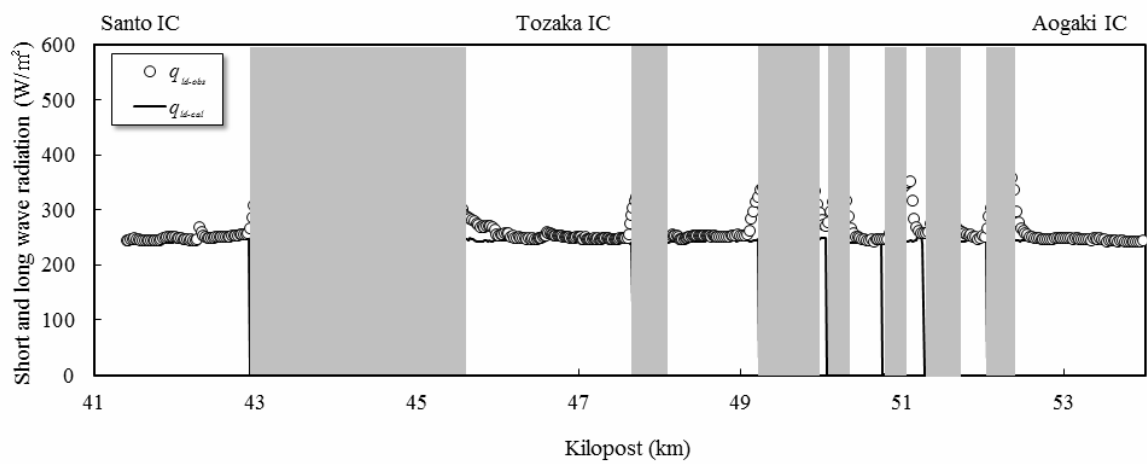


図 2-13 2010 年 11 月 11 日 0 : 00 における長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

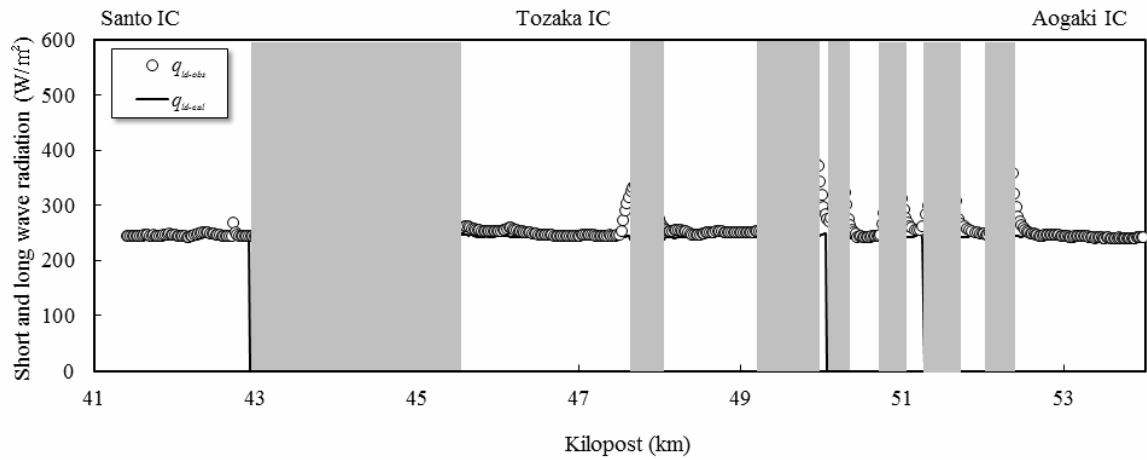


図 2-14 2010 年 11 月 11 日 3 : 00 における長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

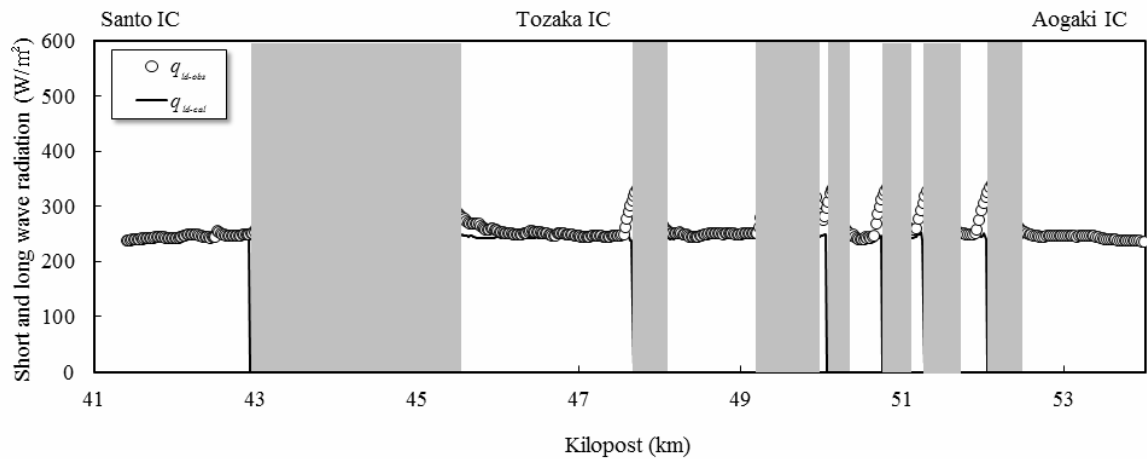


図 2-15 2010 年 11 月 11 日 6 : 00 における長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

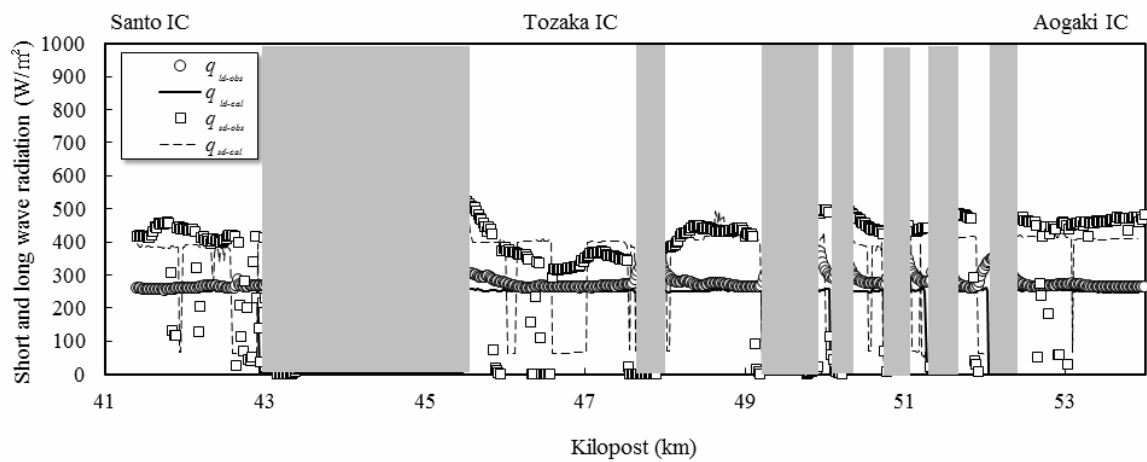


図 2-16 2010 年 11 月 11 日 9 : 00 における日射および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

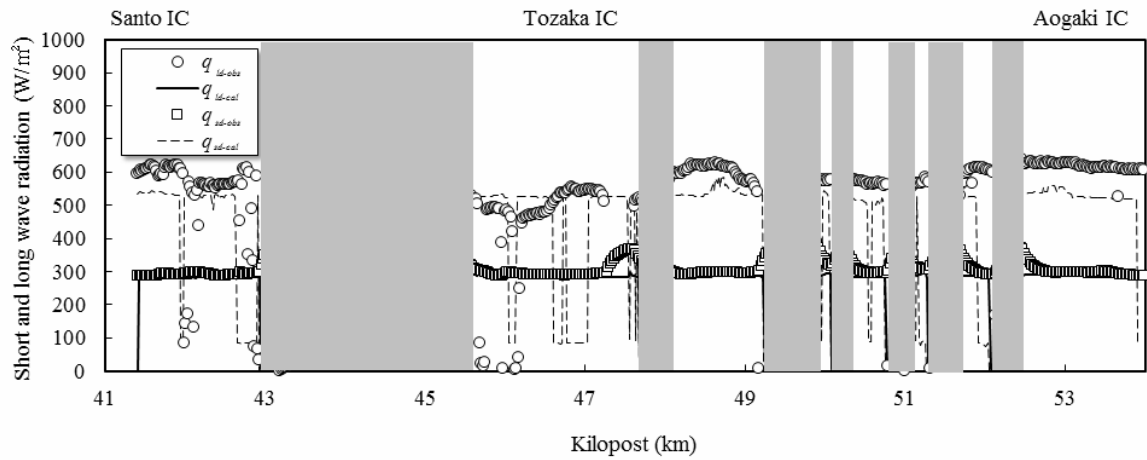


図 2-17 2010 年 11 月 11 日 12 : 00 における日射および長波放射フラックスの実測値および予測値

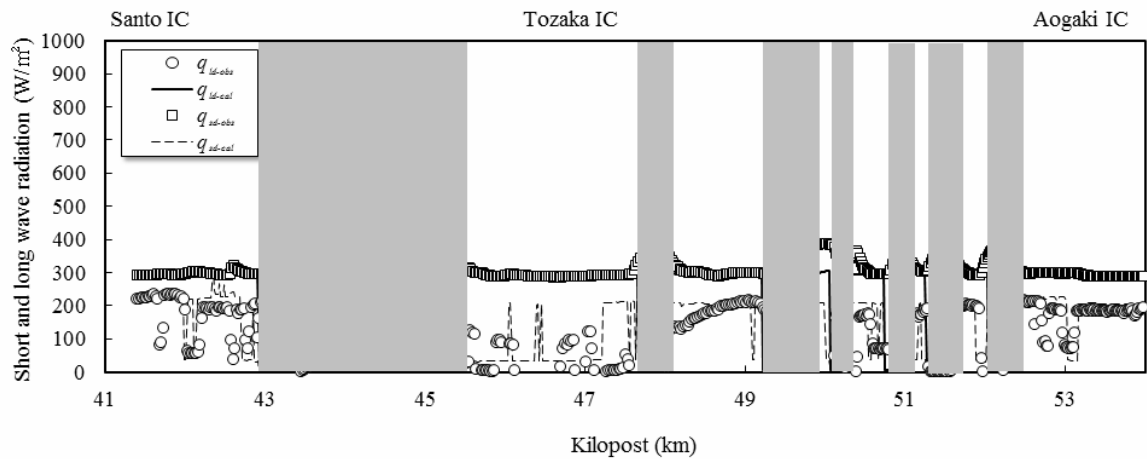


図 2-18 2010 年 11 月 11 日 15 : 00 における日射および長波放射フラックスの実測値および予測値

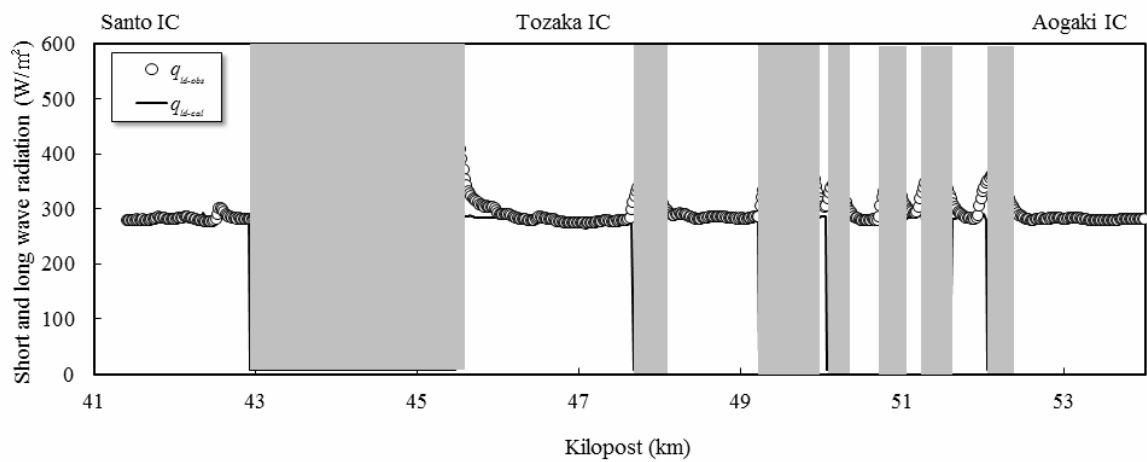


図 2-19 2010 年 11 月 11 日 18 : 00 における長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

## 2. デジタル標高データを用いた広域気象算定法

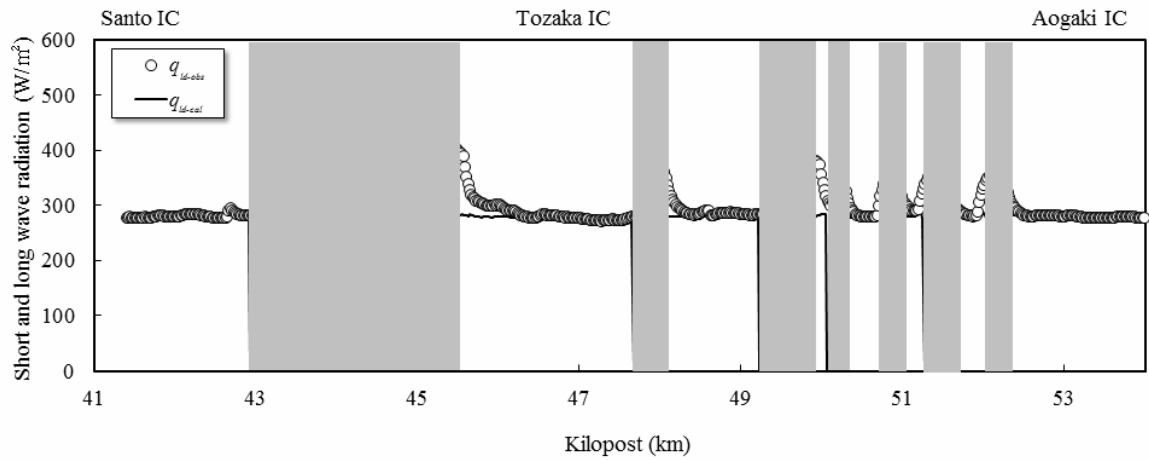


図 2-20 2010 年 11 月 11 日 21 : 00 における長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

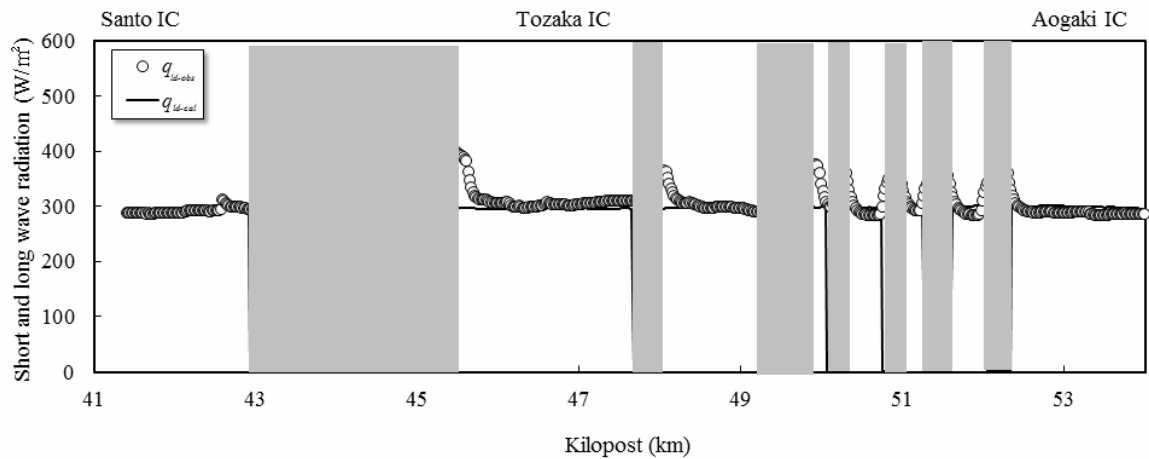


図 2-21 2010 年 11 月 12 日 0 : 00 における長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

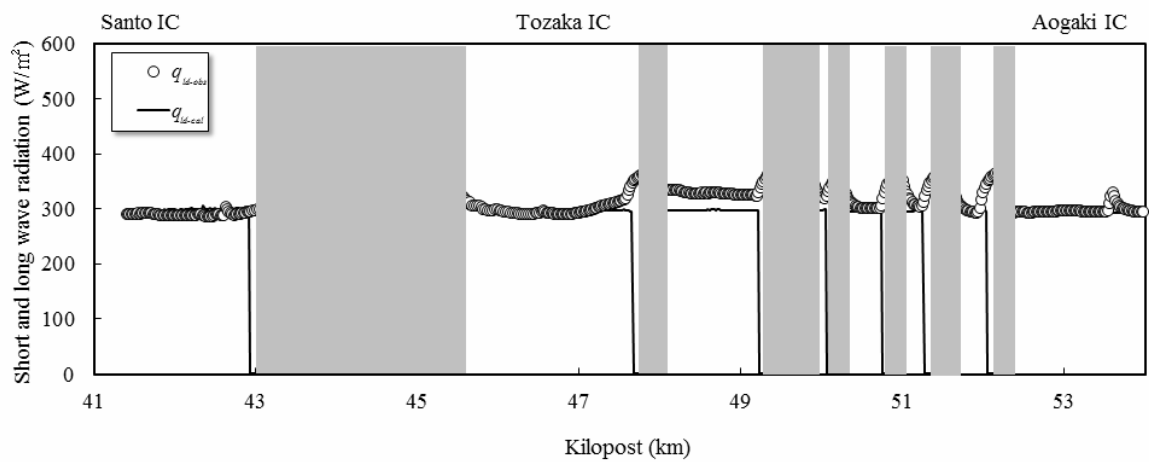


図 2-22 2010 年 11 月 12 日 3 : 00 における長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

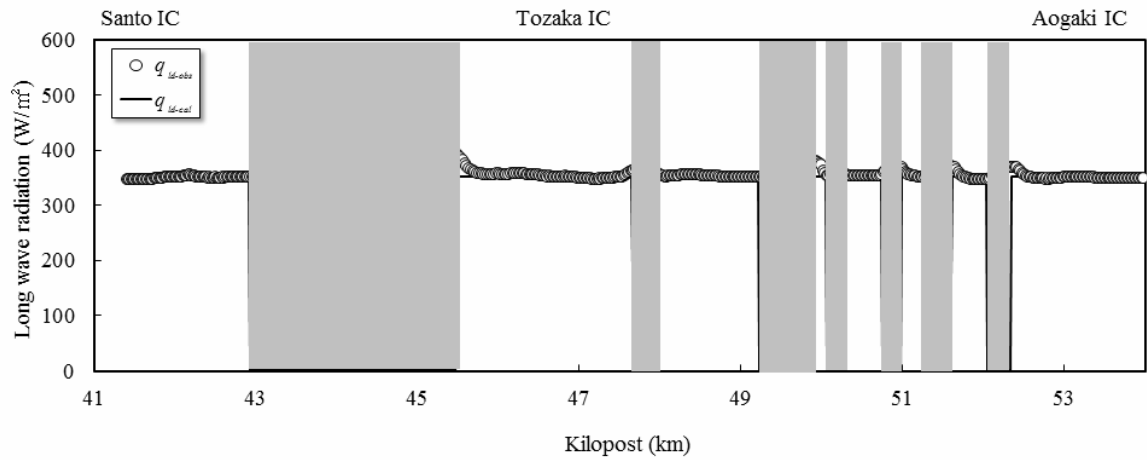


図 2-23 2010 年 11 月 12 日 6 : 00 における長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

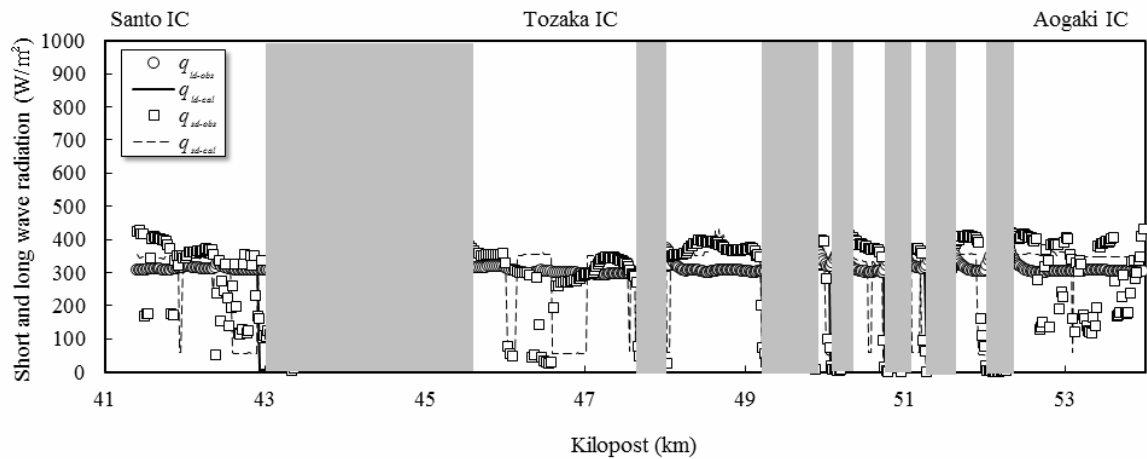


図 2-24 2010 年 11 月 12 日 9 : 00 における日射および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

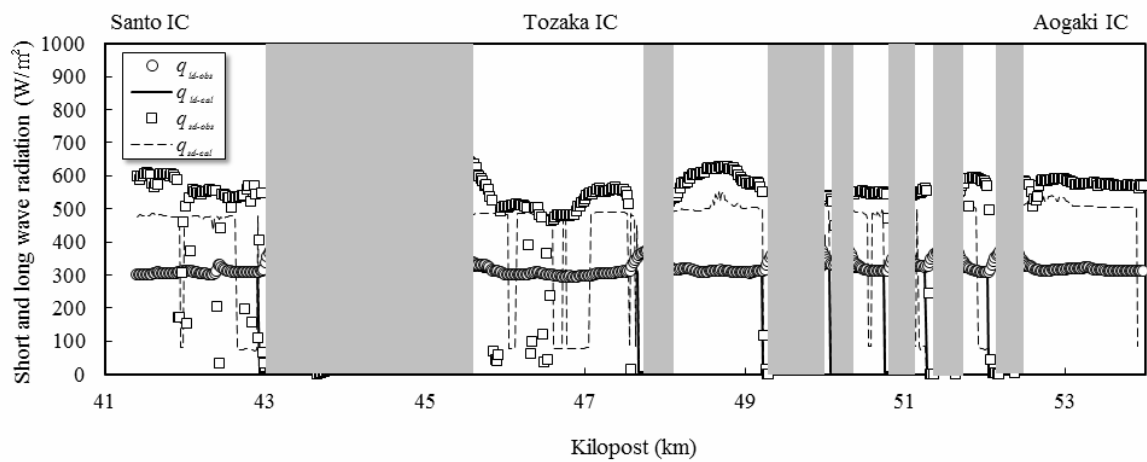


図 2-25 2010 年 11 月 12 日 12 : 00 における日射および長波放射フラックスの実測値および予測値



## 2. デジタル標高データを用いた広域気象算定法

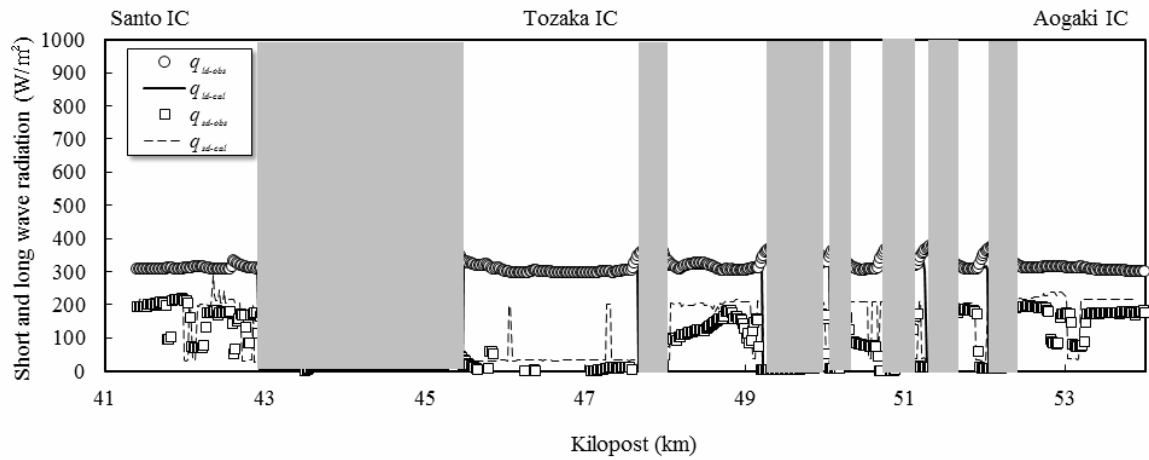


図 2-26 2010 年 11 月 12 日 15 : 00 における日射および長波放射フラックスの実測値および予測値

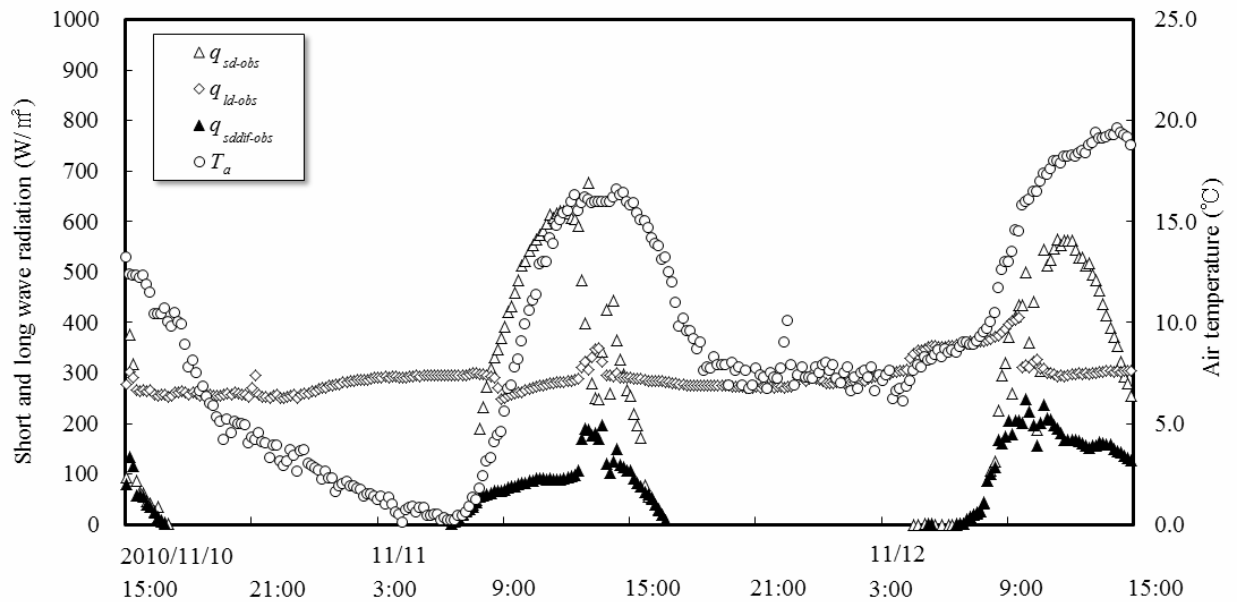


図 2-27 山東 IC における定点気象観測結果<sub>T</sub>

## 2.6.2 実験結果

図 2-11 から図 2-26 に山東 IC—青垣 IC 間の日射フラックスの実測値  $q_{sd-obs}$  (図中□) および長波放射フラックスの実測値  $q_{ld-obs}$  (図中○) の分布を示す。なお、図中灰色の区間はトンネルを示す。また、図 2-27 に山東 IC における定点気象観測の結果を示す。

観測期間中の天候はおおむね快晴であり、 $T_a$  の最大値は  $19.8^{\circ}\text{C}$ 、 $q_{sd-obs}$  の最大値は  $680\text{W/m}^2$  および  $q_{ld-obs}$  の最大値は  $410\text{W/m}^2$  にそれぞれ達した。また、 $q_{sddif-obs}$  は  $q_{sd-obs}$  の 20% から 30% 程度で推移した。夜間は強い放射冷却のため、 $T_a$  は  $5.9^{\circ}\text{C}$  および  $q_{ld-obs}$  は  $250\text{W/m}^2$  まで低下した。

$q_{sd-obs}$  の線的計測結果に着目すると、 $q_{sd-obs}$  は 46 から 47 キロポスト付近および 49 から 52 キロポスト付近で沿道地物の影響を受けて大きく変動した。また、48 キロポスト付近および各トンネルの坑口付近では他の区間と比較して  $q_{sd-obs}$  が高くなる傾向にあった。これは、道路に隣接しているコンクリート法面(図 2-28)やトンネル坑口(図 2-29)による日射の反射のためであると推測される。43 キロポスト付近では、 $q_{sd-obs}$  は数 m の間隔で大きく変動を繰り返した。これは樹木が日射を部分的に遮蔽したためである。

$q_{ld-obs}$  は、 $q_{sd-obs}$  とは対照的に空間方向での変動幅は  $100\text{W/m}^2$  程度と小さくなった。各トンネルの坑口付近では、 $q_{ld-obs}$  は坑口付近の地

形およびトンネル壁面からの輻射により、他の区間と比較して高くなった。

## 2.6.3 解析結果

図 2-11 から図 2-26 にはまた  $q_{sd}$  の予測値  $q_{sd-cal}$  (図中破線) および  $q_{ld}$  の予測値  $q_{ld-cal}$  (図中実線) の分布を示す。 $q_{sd-cal}$  の空間分布に着目すると、高い沿道地物が少ない 42 キロポスト付近、48 キロポスト付近および 54 キロポスト付近や切土区間である 53 キロポスト付近の  $q_{sd-cal}$  は概ね  $q_{sd-obs}$  と一致した。他方、47 キロポスト付近では 11 月 11 日および 12 日の 9:00 および 12:00 において、 $q_{sd-cal}$  は  $q_{sd-obs}$  より低く、両者の差は  $500\text{W/m}^2$  に達した。この理由としては、本計算で用いた DSM の解像度が 50m と粗く、道路付近の地形を正確に表現できなかったために日射遮蔽判定が正しく行われなかったためと考えられる。同様の理由により、43 キロポスト付近における  $q_{sd-cal}$  も  $q_{sd-obs}$  と異なる傾向を示した。

$q_{ld-cal}$  はほぼ全ての時間および区間で  $q_{ld-obs}$  と良好に一致した。ただし、各トンネル坑口では  $q_{ld-cal}$  は変動幅が小さく  $q_{ld-obs}$  との誤差は最大で  $100\text{W/m}^2$  となった。これは DSM が実際の地形を正確に表現できていないことに加え、本モデルではトンネル内部壁面などからの輻射が考慮されていないためだと推測される。



図 2-28 道路に隣接するコンクリート法面 (48.5 キロポスト付近)



図 2-29 トンネル坑口付近の日射反射 (50.4 キロポスト付近)

表 2-1 日射フラックスおよび長波放射フラックスの予測誤差

時刻	$e_{sd}$ (全区間, $\text{W/m}^2$ )	$e_{sd}$ (日射遮蔽判定が正しく 行われた区間, $\text{W/m}^2$ )	$p_l$ (%)	$e_{ld}$ (全区間, $\text{W/m}^2$ )
2010/11/10 18:00	-	-	-	14
2010/11/10 21:00	-	-	-	23
2010/11/11 0:00	-	-	-	15
2010/11/11 3:00	-	-	-	12
2010/11/11 6:00	-	-	-	10
2010/11/11 9:00	124	48	74	17
2010/11/11 12:00	174	59	72	25
2010/11/11 15:00	71	31	71	12
2010/11/11 18:00	-	-	-	11
2010/11/11 21:00	-	-	-	13
2010/11/12 0:00	-	-	-	20
2010/11/12 3:00	-	-	-	14
2010/11/12 6:00	-	-	-	4
2010/11/12 9:00	84	35	76	9
2010/11/12 12:00	149	69	78	12
2010/11/12 15:00	63	37	73	10
全時間平均	111	47	74	14

表 2-1 に各時刻における  $q_{sd-cal}$  および  $q_{ld-cal}$  の予測誤差  $e_{sd}$  および  $e_{ld}$  と全区間長に対する日射遮蔽判定が正しく行われた区間長の割合  $p_l$  をそれぞれ示す。日中の全時間に亘る  $e_{sd}$  の平均値は  $111\text{W/m}^2$  となった。このうち、日射遮蔽判定が正しく行われた区間における  $e_{sd}$  の平均値は  $47\text{W/m}^2$  であった。このことから、 $e_{sd}$  は日射遮蔽判定の誤りに大きく起因することが知れる。なお、 $p_l$  は時刻に係わらず 75% 前後であった。

$e_{ld}$  は全ての時刻で低い値となり、測定期間に亘る  $e_{ld}$  の平均値は  $14\text{W/m}^2$  となった。

## 2.7 おわりに

本章ではデジタル標高データ(DSM)および

数値予報値を用いて路面温度に大きな影響を及ぼす日射および長波放射フラックスを予測するための広域気象モデルを構築した。また、兵庫県北近畿豊岡自動車道において日射および長波放射フラックスの線的計測を行い、予測値と比較した。以下に得られた知見を列挙する。

- (1) 広域気象算定法を用いることで、沿道地物および気象条件が日射フラックスに与える影響の予測を概ね正しく行うことが可能となった。
- (2) 日射フラックスの予測誤差は主に日射遮蔽判定の誤りに起因する。
- (3) (2)の主な原因は、DSM で表現できないような小さな沿道地物による。

- (4) 長波放射フラックスは路線に亘り概ね正確に予測することが可能となった.

### 参考文献

- 18) 高橋尚人, 浅野基樹, 石川信敬: 沿道構造物の影響を考慮した路面温度推定モデルの構築について, 寒地技術論文・報告集, Vol. 22, pp. 153-158, 2006.
- 19) Mahoney, W.P. and W. Myers. (2003) Predicting Weather and Road Conditions: Integrated Decision Support Tool for Winter Maintenance Operations. In *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 1824*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 98-105.
- 20) 武市靖: 路面凍結の予測に関する研究, 土木学会論文集, No. 470/IV-20, pp. 175-184, 1993.
- 21) Thornes, J. E. , Cavan, G. and Chapman, L. : The use of GIS and IceMiser to predict winter road surface temperatures in Poland, *12<sup>th</sup> International Road Weather Conference*, 2004
- 22) 長沢工: 日の出・日の入りの計算 天体の出没自国の求め方, 地人書館, 1999.
- 23) 近藤純正: 水環境の気象学 一地表面の水収支・熱収支一, 朝倉書店, 1994.
- 24) 文部省国立天文台: 理科年表机上版, Vol. 74, 2001.
- 25) 宇田川光弘, 木村建一: 水平面全日射量観測値よりの直達日射量の推定, 日本建築学会論文報告集, No.267, pp.83-90, 1978.

## 本章で用いた記号

$\theta$	: $E_r$ の重心から太陽へ向かうベクトル $\vec{V}$ と $E_r$ の法線ベクトルのなす角 (°)	
$\vec{V}$	: 日射ベクトル	(-)
$\vec{V}_{1c}$	: $E_s$ の頂点 1 から $c$ に向かうベクトル	(-)
$\vec{V}_{1r}$	: 頂点1から $E_r$ に向かうベクトル	(-)
$\vec{V}_{1s}$	: 頂点1から太陽に向かうベクトル	(-)
$\vec{V}_{2c}$	: $E_s$ の頂点 2 から $c$ に向かうベクトル	(-)
$\vec{V}_{3c}$	: $E_s$ の頂点 3 から $c$ に向かうベクトル	(-)
$\vec{N}_P$	: $P$ の法線ベクトル	(-)
$\vec{V}_r$	: $E_s$ の重心から $E_r$ に向かうベクトル	(-)
$\vec{V}_s$	: $E_s$ の重心から太陽に向かうベクトル	(-)
$A$	: 太陽の方位角	(°)
$C_{all}$	: 全雲量	(-)
$C_h$	: 高層雲量	(-)
$C_l$	: 下層雲量	(-)
$C_m$	: 中層雲量	(-)
$E_r$	: 道路面要素	(-)
$E_s$	: 地形面要素	(-)
$H$	: 地表付近の空気の水蒸気分圧	(mmHg)
$J$	: 太陽定数	(W/m <sup>2</sup> )
$K_t$	: 正規化した日射量	(-)
$K_{tc}$	: 日射の直散分離に用いる判別係数	(-)
$N_{all}$	: 全走査線本数	(-)
$N_j$	: 要素番号 $i$ の $E_r$ から全方位角および全仰角に向けて走査線を伸ばし、 要素番号 $j$ の $E_s$ ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) と最初に交差する走査線の本数	(-)
$p$	: 大気透過率	(-)
$P$	: $E_s$ を含む平面	(-)
$RH_a$	: 大気の相対湿度	(-)
$S$	: 直達日射遮蔽の判別値	(-)
$T$	: 時刻変数	(-)
$T_a$	: 地表付近の空気の絶対温度	(K)
$T_{ch}$	: 高層雲の雲底絶対温度	(K)
$T_{cl}$	: 低層雲の雲底絶対温度	(K)
$T_{cm}$	: 中層雲の雲底絶対温度	(K)
$T_{s, j}$	: 要素番号 $j$ の $E_s$ における表面温度	(K)
$al_j$	: 要素番号 $j$ の $E_s$ のアルベド	(-)
$c$	: $P$ と $\vec{V}$ の交点	(-)
$d_1$	: $c$ から太陽までの距離	(m)
$d_2$	: $c$ から $E_r$ の重心までの距離	(m)
$e$	: 黄道傾斜角	(°)
$e_{ld}$	: 長波放射フラックスの予測誤差	(W/m <sup>2</sup> )

## 2. デジタル標高データを用いた広域気象算定法

$e_{sd}$	: 日射フラックスの予測誤差	(W/m <sup>2</sup> )
$f_{all}$	: $E_r$ から全地形面要素への形態係数	(-)
$f_{ij}$	: $N_j$ と $N_{all}$ の比	(-)
$h$	: 太陽高度	(°)
$h'$	: 大気による屈折を考慮した太陽高度	(°)
$n$	: 地形面要素の数	(-)
$p_{dif}$	: $q_{sd0}$ に占める天空散乱日射フラックスの比率	(-)
$p_{dir}$	: 直達日射フラックスが全天日射フラックスに占める割合	(-)
$p_k$	: 大気の水蒸気圧	(hPa)
$p_{ksat}$	: 大気の飽和水蒸気圧	(hPa)
$q_{ld}$	: $E_r$ に入射する長波放射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{ld-cal}$	: 長波放射フラックスの計算値	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{ld-obs}$	: 長波放射フラックスの実測値	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{ld0}$	: 遮蔽物がない場合に $E_r$ に到達する天空長波放射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{ldc}$	: 雲がある場合の天空長波放射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{ldf}$	: 快晴時における天空長波放射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{ls}$	: 山岳からの $E_r$ への要素輻射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sd}$	: $E_r$ に入射する日射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sd, j}$	: 要素番号 $j$ の $E_s$ の周辺に遮蔽物 がない場合に到達する全天日射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sd-cal}$	: 日射フラックスの計算値	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sd-obs}$	: 日射フラックスの実測値	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sd0}$	: 沿道地物がない場合に $E_r$ に到達する全天日射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sdf}$	: $E_r$ への散乱日射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sdfc}$	: 雲がある場合の散乱日射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sdf}$	: 快晴時における散乱日射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sdr}$	: $E_r$ への直達日射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sdr}$	: 雲がある場合の直達日射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sdrf}$	: 快晴時における直達日射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sr}$	: $E_r$ に到達する山岳からの反射日射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$s_d$	: 1 日の経過時間	(sec)
$s$	: Stefan-Boltzmann 定数	(W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
$t$	: 太陽の時角	(°)
$\Lambda$	: 対象地点の東経	(°)
$\Lambda_s$	: 太陽の黄経	(°)
$\Theta$	: 恒星時	(-)
$\alpha$	: 太陽の赤経	(°)
$\delta$	: 太陽の赤緯	(°)
$\varepsilon_j$	: 要素番号 $j$ の $E_s$ の射出率	(-)
$\phi$	: 対象地点の緯度	(°)
$\theta_1$	: $\vec{N}_p$ と $\vec{V}_r$ のなす角	(°)

## 2. デジタル標高データを用いた広域気象算定法

---

$\theta_2$	: $\vec{N}_P$ と $\vec{V}_s$ のなす角	(°)
$\theta_{sn}$	: 太陽と $E_s$ の重心を結ぶ線分と $E_s$ の法線ベクトルのなす角	(°)
$\xi$	: $\vec{V}$ の $c$ での内分比	(-)



### 3. 広域路面温度予測モデル

#### 3.1 はじめに

第1章で述べたように、より効率的な冬期道路管理を行うための手法の1つとして、路面温度予測モデル(RSTF モデル)を用いて適切なタイミングでの凍結防止剤散布や除雪実施が期待されている。路面温度は天候による気温、日射および長波放射フラックスの変動といった自然要因、沿道地物による日射の遮蔽や反射、輻射といった地形的要因、車両通過に伴う風速の変化や日射の遮蔽といった人為的要因など多くの要因に左右される<sup>1)</sup>。このうち、自然要因および地形的要因は第2章で構築した広域気象モデルにより良好な精度で考慮することが可能となった。本章では、広域気象モデルに人為的要因を考慮した熱移動モデルを組み込み、広域に亘る路面温度予測を行うことができる新しい広域路面温度予測モデル(SAFF モデル)を示す。また、実際の冬期道路管理で必要とされる迅速な路面温度予測が可能となるように、SAFF モデルの計算高速化と予測精度維持の両者を満足する方法を提案する。さらに、北近畿豊岡自動車道において路面温度の線的計測を行い、SAFF モデルによる計算および予測結果と比較することで、モデルの精度および改良が必要な点を明らかにする。

SAFF モデルは、図 3-1 に示すように、広

域気象モデルと路面熱収支モデルから構成される。路面熱収支モデルでは、広域気象モデルで得られた気象条件を基に、車両通過に伴う影響を考慮して舗装および地盤温度の予測を行う。以下にその詳細を示す。

#### 3.2 路面熱収支モデルの熱移動理論

##### a) 道路表層の熱収支

道路路面要素  $E_r$  における乾燥路面表層の熱収支は式(3-1)で与えられる。

$$(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} z_s = q_{cs} + q_{sds} + q_{lds} - q_{lus} + q_{as} \quad (3-1)$$

ここに、

$(\rho c)_s$	: 道路表層の体積熱容量	(J/m <sup>3</sup> K)
$T_s$	: 路面温度	(°C)
$z_s$	: 道路表層厚	(m)
$q_{cs}$	: 路面熱伝導フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sds}$	: 路面に入射する日射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{lds}$	: 路面に入射する長波放射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{lus}$	: 路面からの長波放射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{as}$	: 車両誘発風および自然風による顕熱フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$t$	: 時間	(sec)

である。

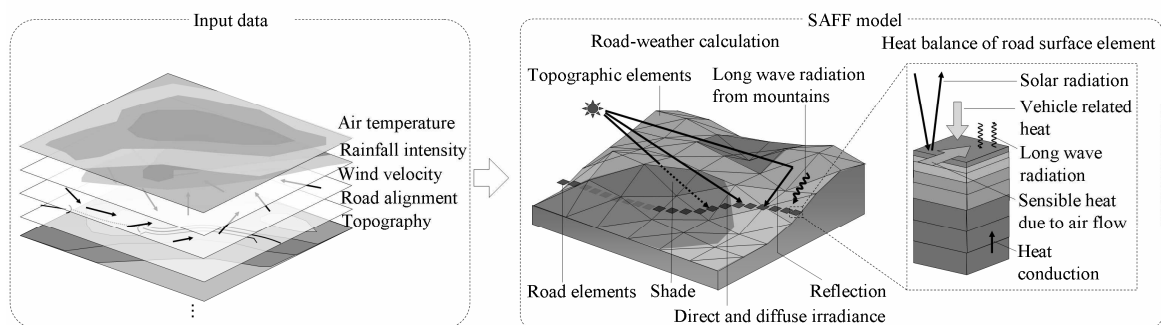


図 3-1 広域路面温度予測モデルの構成

### 3. 広域路面温度予測モデル

$q_{cs}$  は離散化された *fourier* の式より、式(3-2)で与えられる。

$$q_{cs} = -\lambda_p \frac{T_s - T_{s-1}}{d_{s, s-1}} \quad (3-2)$$

ここに、

$\lambda_p$  : 道路表層の熱伝導率 (W/mK)

$T_{s-1}$  : 道路表層下面に隣接する  
道路要素  $s-1$  の温度 (°C)

$d_{s, s-1}$  : 道路表層要素と要素  $s-1$  の  
重心間距離 (m)

である。

$q_{sds}$  は式(3-3)で与えられる。

$$q_{sds} = al_s q_{sd} \frac{(t - t_{vp})}{t} \quad (3-3)$$

ここに、

$al_s$  : 路面のアルベド (-)

$q_{sd}$  :  $E_r$  に入射する日射  
フラックス (W/m<sup>2</sup>)

$t_{vp}$  : 任意の時間  $t$  の間に車両が  
 $E_r$  の重心上を通過する時間(sec)

である。

$q_{lds}$  は式(3-4)で与えられる。

$$q_{lds} = \left\{ q_{ld} + \varepsilon_v s (T_v + 273.15)^4 \right\} \frac{t_{vp}}{t} \quad (3-4)$$

ここに、

$\varepsilon_v$  : 車両底面の射出率 (-)

$s$  : *Stefan-Boltzmann* 定数 (W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

$T_v$  : 車両底面温度 (°C)

である。

$T_v$  は渡邊らが行った車両底部の温度計測結果<sup>2)</sup>に従って、ここでは  $T_v = 40^\circ\text{C}$  を与える。

$q_{lus}$  は *Stefan-Boltzmann* の法則に従い、式(3-5)で与えられる。

$$q_{lus} = \varepsilon s (T_s + 273.15)^4 \quad (3-5)$$

$q_{as}$  は *Newton* の冷却則より、式(3-6)で与えられる。

$$q_{as} = h(T_a - T_s) \quad (3-6)$$

ここに、

$h$  : 舗装一大気間の熱伝達率(W/m<sup>2</sup>K)

$T_a$  : 気温 (°C)

である。 $h$  は藤本らが行った実験結果<sup>3)</sup>に従って高さ0.2mの風速を基に式(3-7)で与えられる。

$$h = 10.4V_w^{0.7} + 2.2 \quad (3-7)$$

ここに、

$V_w$  : 地上0.2mにおける自然風  
または車両誘発風速 (m/sec)

である。自然風の場合は、3.4.1 a)で述べるように風速に1/7乗則を適用して測定高さ(地上1.5m)風速から地上0.2mの風速を推定した。車両誘発風速は地上0.2mでの風速をそのまま用いた。また、車両誘発風速の  $V_w$  は、車両速度を変数とした藤本らの式<sup>3)</sup>に従う。

なお、道路表層以深の道路要素温度  $T_p$  は、以下の式で求められる。

$$(\rho c) \frac{\partial T_p}{\partial t} = -\frac{\partial q_c}{\partial z} \quad (3-8)$$

ここに、

$q_c$  : 舗装および土壌の熱伝導  
フラックス (W/m<sup>2</sup>)

である。

#### b) 境界条件および初期条件

本モデルでは舗装および地盤温度計算を路面下2m( $z=0$ : 地表)まで行う。初期路面温度はサーマルマッピングで得られた実測値を与えた。底部境界条件の地盤温度は兵庫県春日和田山道路和田トンネル坑口で測定した舗装および地盤温度結果を与えた。初期温度分布は和田トンネル坑口の地盤温度鉛直分布に相似、あるいは底部境界条件を基に計算された熱平衡状態の温度分布より決定した。

なお、地形面要素の表面温度も道路面要素の表面温度を求めるアルゴリズムに従って計算された。

### 3.3 広域路面温度予測モデルの計算高速化

計算対象区間が長くなると計算時間が長く

なり、迅速な路面温度予測結果を用いた冬期道路管理を困難にさせ、計算本来の目的を損なう。

そこで本研究では、路線温度分布の計算に関して、以下の2つの手法を用いて計算の高速化を試みた。

### 3.3.1 地形面要素の最適化

$E_r$  に入射する日射フラックス  $q_{sd}$  および長波放射フラックス  $q_{ld}$  に及ぼす地形の影響は、道路面要素  $E_{r,i}$  と地形面要素  $E_{s,j}$  間の形態係数  $f_{ij}$  に大きく左右される。 $f_{ij}$  の計算は道路面要素や地形面要素の数が増加するに従い指数関数的に増大する傾向にあり、広域 RSTF モデルで行うような地形間の形態係数を高速に計算することは容易ではない。形態係数計算の高速化手法は、山田らによるヘミスフィア法<sup>4)</sup>や吉田らによるモンテカルロ法<sup>5)</sup>などが提案されているが、これらを地形および地形面要素間での形態係数に使用することは計算精度の面で困難であるため、新しい手法が必要となる。本研究では  $f_{ij}$  が道路面要素—地形面要素間の距離  $r$  の2乗に反比例して小さくなる<sup>6)</sup>ことに着目して、 $r$  が大きくなるにつれて地形面要素を大きく(地形面要素数を削減)しながらも、山岳の形状をできるだけ正確に表現するための方法を提案する。

SAFF モデルでは結合基準距離  $r_s$  を前もって複数( $x$  個)設定し( $r_{s1} < r_{s2} < \dots < r_{sn}$ )、図 3-2 のように、 $r < r_{s1}$ ,  $r_{s1} < r < r_{s2}$ , ...,  $r_{sx} < r$  に従って、段階的に異なる大きさの地形面要素を結合し、要素数の削減を行った。

図 3-3 は地形面要素の結合手法の概要を示す。斜辺を共有する2つの三角形地形面要素(図 3-3 (A)の太線で示す要素)を結合した4つの四角形面要素( $R_1 \sim R_4$ )に注目する(図 3-3 (B)を参照)。その後、 $R_1$  から  $R_4$  の  $r$  が結合前の地形面要素の  $r$  と同じ  $r_s$  に属するか否か、また  $R_1$  から  $R_4$  の面積が同じかどうか調べる。両者を満たす場合、4つの四角形面要素

### 3. 広域路面温度予測モデル

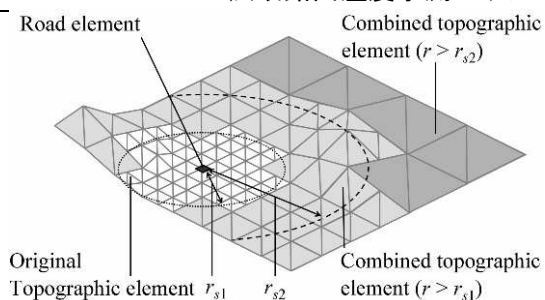


図 3-2 要素結合基準距離と要素サイズの関係

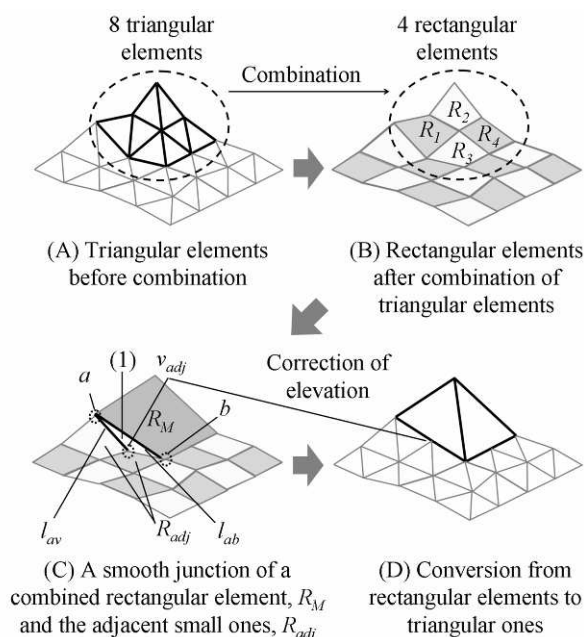


図 3-3 地形面要素サイズの決定手法

素を結合させて、新たな面要素  $R_M$  を作る(図 3-3 (C)を参照)。このとき、大きさや傾斜が異なる面要素が隣接すると地形データに隙間が生じ(図 3-3 (C)中の(1))、日射遮蔽の判別および形態係数の計算が正しく行われなくなることがある。そこで、以下のような要素頂点の標高補正を行って、地形を修正する。

$R_M$  と隣接する四角形面要素のうち、補正が必要な2つの要素  $R_{adj}$  の共通頂点  $v_{adj}$  を  $R_M$  の辺  $ab$  上に移動させる。この  $v_{adj}$  の移動は、 $v_{adj}$  の標高  $z_{v-adj}$  を式(3-9)により行われる。

$$z_{v-adj} = \frac{(z_2 - z_1)l_{av}}{l_{ab}} \quad (3-9)$$

ここに,

$z_1$  および  $z_2$  :  $R_M$  の頂点  $a$  および  $b$  の標高 (m)

$l_{ab}$  : 辺  $ab$  の長さ (m)

$l_{av}$  :  $R_M$  の頂点  $a$  から  $v_{adj}$  までの距離 (m)

である.

四角形面要素の修正が終わると, 全ての四角形面要素を 2 つの三角形面要素に分解して, 路面温度計算に用いられる地形面要素の作成が終了する(図 3-3(D)).

### 3.3.2 不可視面要素の計算除外

図 3-4 のように道路面要素  $E_r$  から地形面要素  $E_{s1}$  へ向けて発した 1 つの走査線が,  $E_{s1}$  の手前にある  $E_{s2}$  と交差する場合,  $E_{s1}$  は  $E_r$  から不可視となる. この場合,  $E_{s1}$  から  $E_r$  に向かう反射日射フラックスおよび輻射フラックスは  $E_{s2}$  によって遮蔽されるため,  $E_r$  に熱的影響を及ぼさない. 従って, 全ての道路面要素に対して不可視な地形面要素(不可視面要素と呼称)は, 計算の対象外となる. SAFF モデルでは不可視面要素を検出し, 不可視面要素に係わる計算を省略することで, 計算の高速化を図る.

### 3.3.3 路面温度の計算手順

図 3-5 は SAFF モデルの計算手順を示す. SAFF モデルは, 第 2 章で述べたように道路気象計算(地形形状計算, 日射フラックスおよび長波放射フラックス計算)および路面熱収支(路面温度)計算で構成され, 次の 5 つの計算ステップを踏む. (i)地形形状計算を行い,  $r$  に応じた地形面要素の結合を行う. (ii)全面要素(道路面要素および地形面要素)の傾斜角および方位角を求める. (iii)各道路面要素と地形面要素の形態係数の計算および両要素間の可視・不可視判別を行う. (iv)全面要素の太陽に対する日向および日陰判別を行い, 各面要素に入射する  $q_{sd}$  および  $q_{ld}$  を, 式(2-24)およ

び式(2-33)よりそれぞれ求める. (v)式(3-1)を用いて地形面要素の表面温度を計算した後, 道路面要素の表面温度を求める.

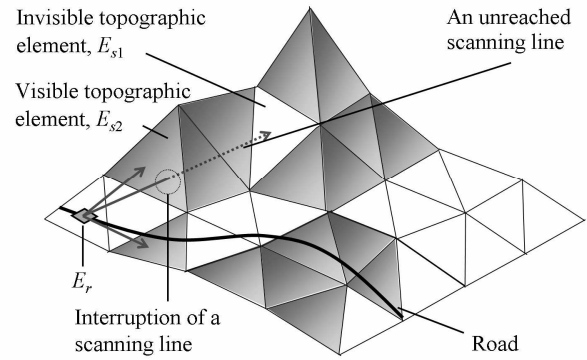


図 3-4 可視および不可視面要素の判別方法

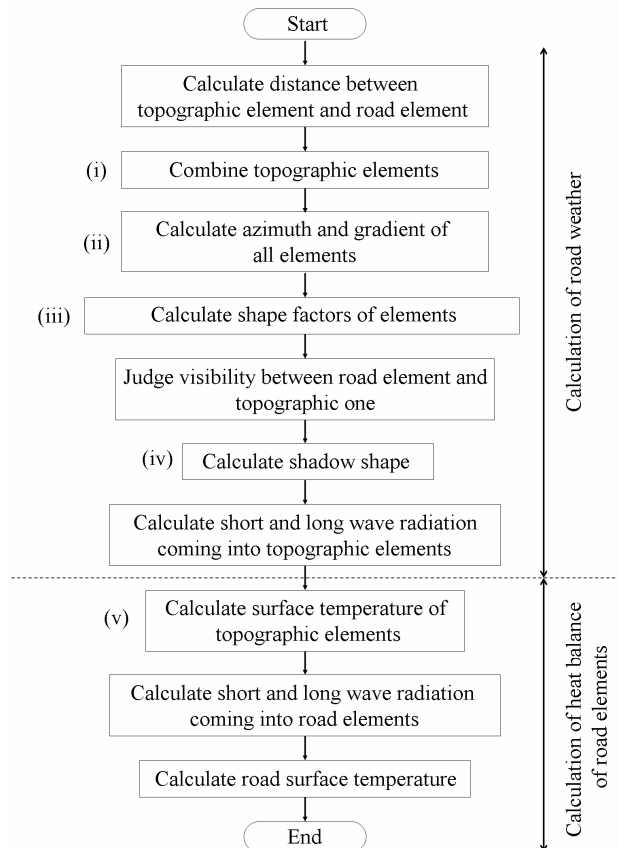


図 3-5 SAFF モデルの計算手順

### 3.4 気象実測値を用いた SAFF モデルの精度検証実験および解析

2010 年 11 月 10 日から 12 日に兵庫県春日和田山道路の山東 ICー青垣 IC 間 12.6km において気象および路面温度の定点観測を行い、得られた結果を基に路面温度、日射および長波放射フラックスの空間分布計算を行った。同時に、同区間で路面温度、日射フラックスおよび長波放射フラックスの空間分布計測を行い、計算値と比較することで SAFF モデルの路面熱収支計算、太陽の高度および方位角を求める計算および沿道地物による日射遮蔽、輻射および日射反射の影響を求める計算に対する精度検証を行った。以下にその詳細を示す。

#### 3.4.1 実験および計算概要

##### a) 定点気象観測

2010 年 11 月 10 日 15:00 から 48 時間に亘り、山東 IC および青垣 IC に気象ステーションを設置した。気象ステーションでの測定内容と測定装置は以下の通りである。

$q_{sd}$  および  $q_{ld}$  は地上 1.0m に設置された放射収支計(Kipp&Zonen 製 CNR 1)により、 $T_a$  および相対湿度  $RH_a$  は地上 1.0m に設置された温湿度計(Vaisala 製 HMP 45A)により、 $V_w$  は地上 1.5m に設置された三杯式風速計(Davis 製 wizard III)により、それぞれ計測した。山東 IC ではシャドウブレードと全天日射計(Kipp&Zonen 製 CMP 3)を用いて、 $q_{sdf}$  および  $p_{dif}$  を 1 分毎に計測した。

##### b) 路面温度、日射および長波放射フラックスの線的計測

放射温度計(Raytek 製 MI3)および放射収支計(Kipp&Zonen 製 CPR-PCM-01L)を搭載した車両(サーマルマッピング車両)で対象路線を走行し、 $T_s$ 、 $q_{sd}$  および  $q_{ld}$  の空間分布を約 2m 間隔で求めた。放射温度計は車両前部(地上 0.5m)に路面に対し鉛直に設置した。放射温度計は断熱材で覆い、ヒーターを取り付けるこ

とで外気温が測定結果に影響を与えないようにした。なお、放射温度計の測定範囲は $-40^{\circ}\text{C}$ ～ $600^{\circ}\text{C}$ および精度は $0.1^{\circ}\text{C}$ である。また、放射収支計は車両上部(地上 2.0m)に設置した(図 3-6 右の写真を参照)。このサーマルマッピングは測定期間中、3 時間毎に行われた。

##### c) 路面温度の計算

a)で得られた気象および路面温度計測結果を基に、SAFF モデルを用いて路面温度、日射フラックスおよび長波放射フラックスの空間(路線)分布を計算した。計算では、兵庫県春日和田山道路山東 ICー青垣 IC 間のうちトンネル部を除く路線を対象とし、道路路面要素は形態係数の計算精度を低下させないように約 20m 間隔で区切り、地形面要素の形態係数、路面温度、路面に入射する日射フラックスおよび長波放射フラックスを 48 時間に亘り求めた。地形面要素は、道路周辺の幅 2km および長さ 15km の範囲を対象とし、解像度 50m の DSM を用いて作成した。なお、 $r_s$  は 100m、200m および 400m の 3 つを用いた。本計算では SAFF モデルの計算精度を検証する目的で、路線の各地点における道路気象データ( $T_a$ 、 $V_w$ 、 $q_{sdr}$ 、 $q_{sdf}$  および  $q_{ld}$ )は、山東 IC および青垣 IC に設置された気象ステーションおよびサーマルマッピング車両から得られた実測値を与えた。また、 $T_s$  の初期値は 11 月 10 日 15:00 の路線計測結果を与えた。交通量は、2005 年道路交通センサスにより青垣 IC、遠阪

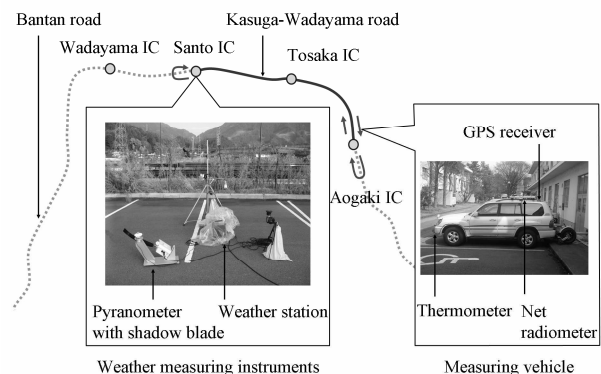


図 3-6 野外観測の概要

### 3. 広域路面温度予測モデル

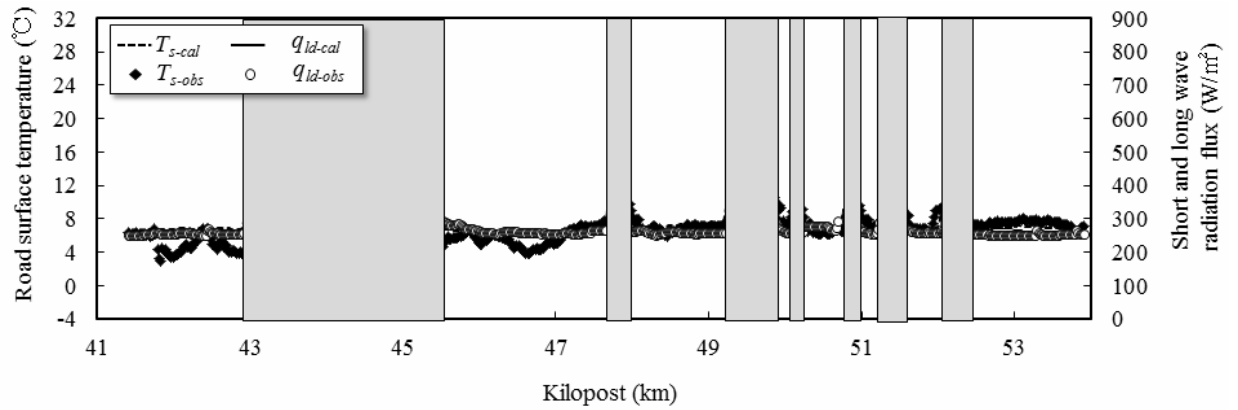


図 3-7 2010 年 11 月 10 日 18 : 00 における路面温度および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

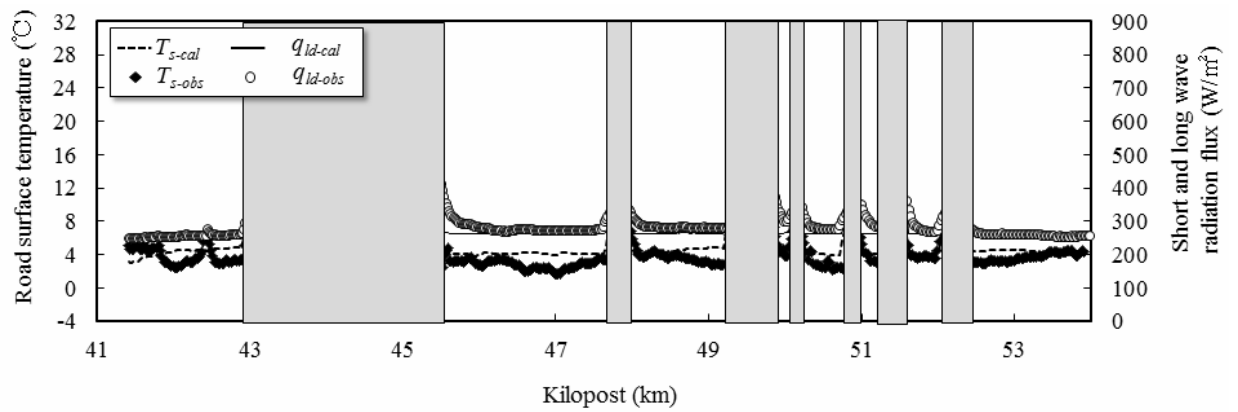


図 3-8 2010 年 11 月 10 日 21 : 00 における路面温度および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

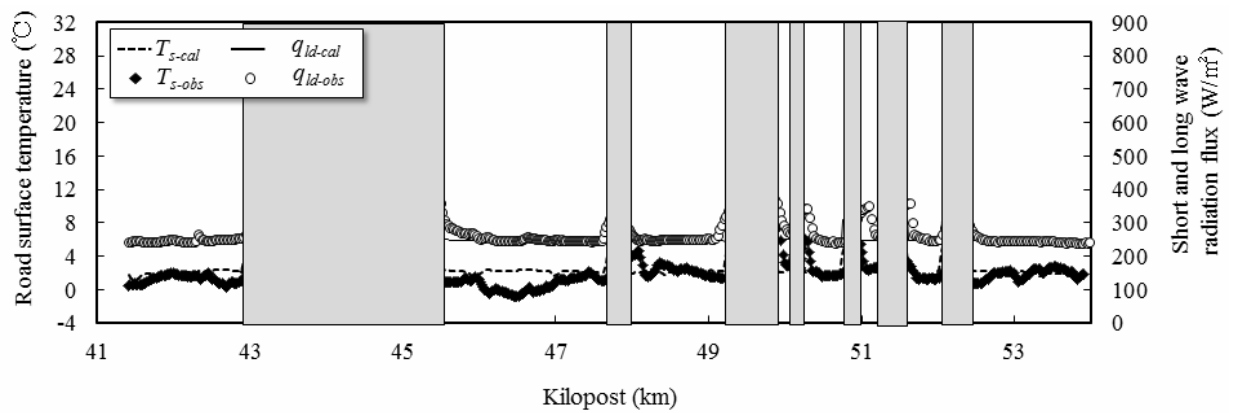


図 3-9 2010 年 11 月 11 日 0 : 00 における路面温度および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

### 3. 広域路面温度予測モデル

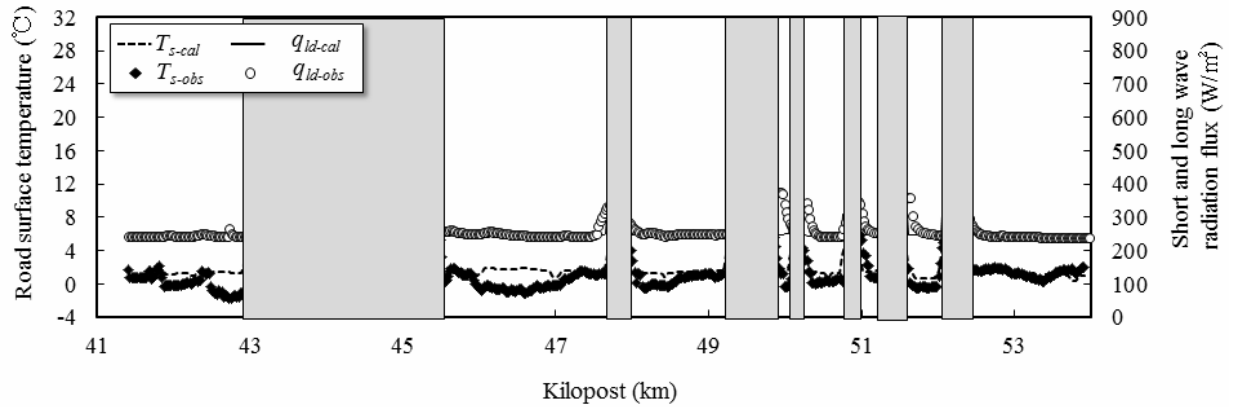


図 3-10 2010 年 11 月 11 日 3 : 00 における路面温度および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

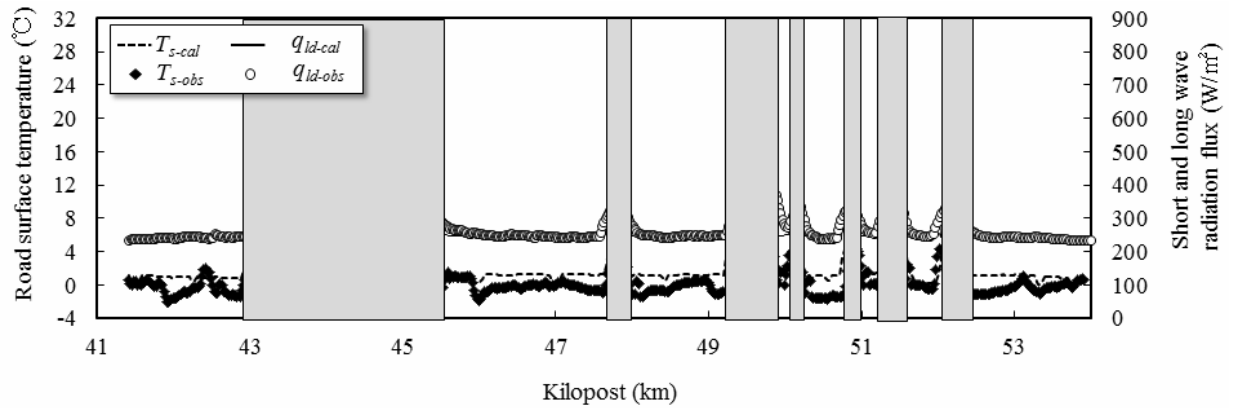


図 3-11 2010 年 11 月 11 日 6 : 00 における路面温度および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

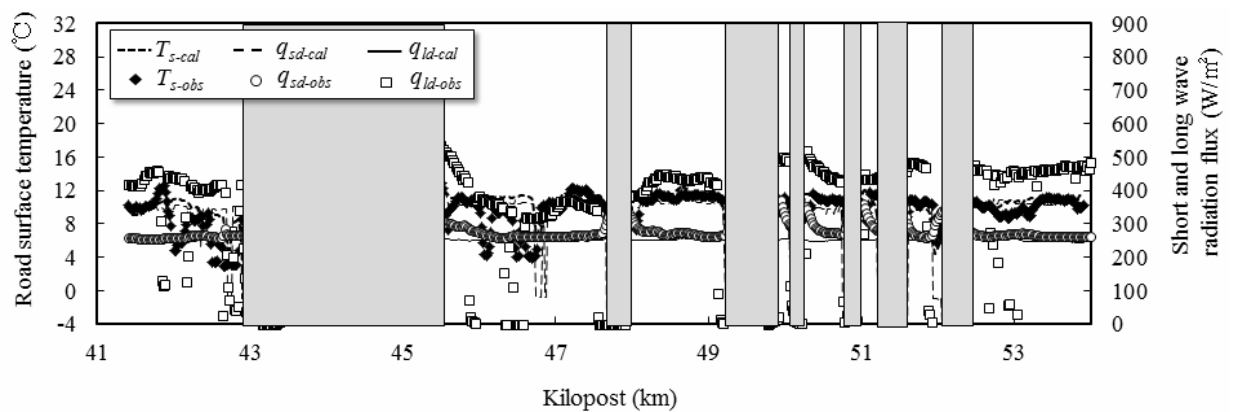


図 3-12 2010 年 11 月 11 日 9 : 00 における路面温度、日射および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

### 3. 広域路面温度予測モデル

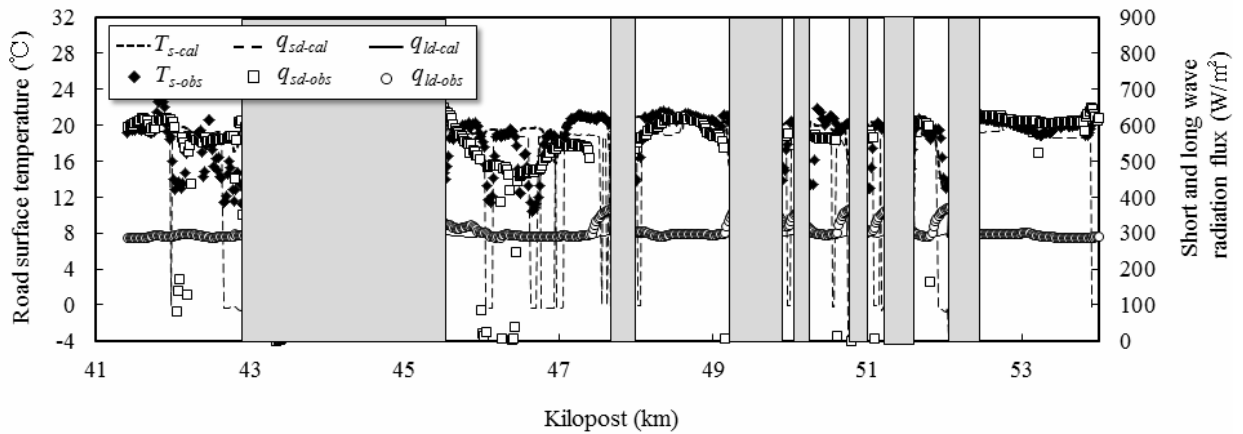


図 3-13 2010 年 11 月 11 日 12 : 00 における路面温度，日射および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

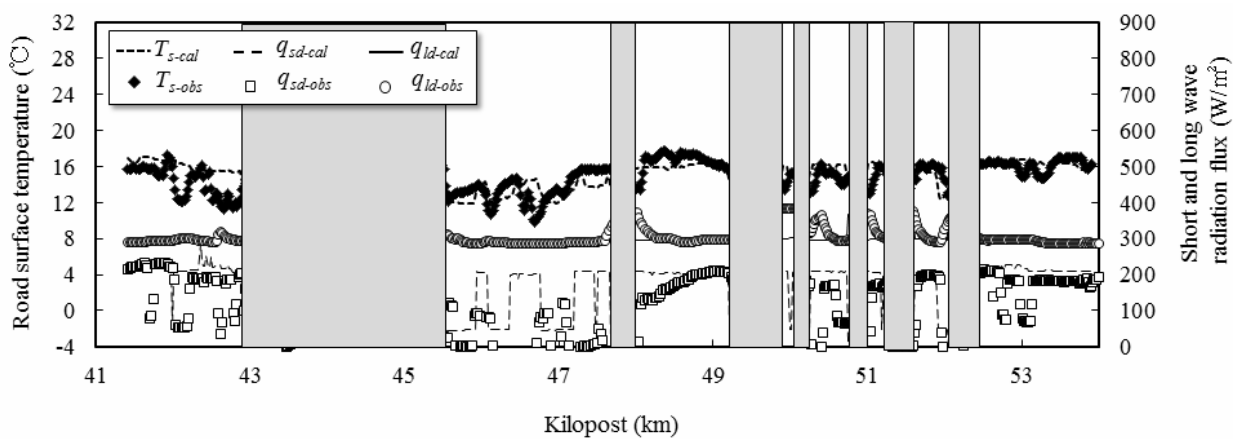


図 3-14 2010 年 11 月 11 日 15 : 00 における路面温度，日射および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

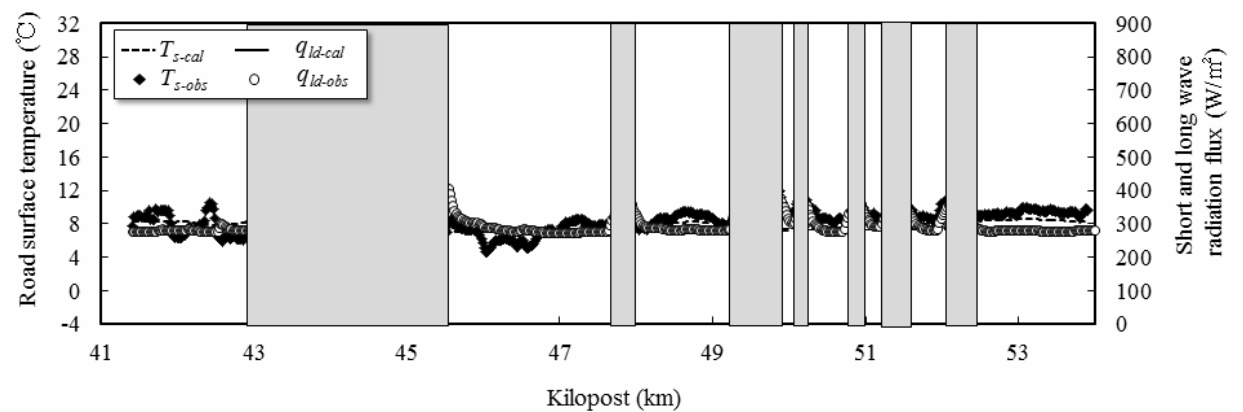


図 3-15 2010 年 11 月 11 日 18 : 00 における路面温度および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>



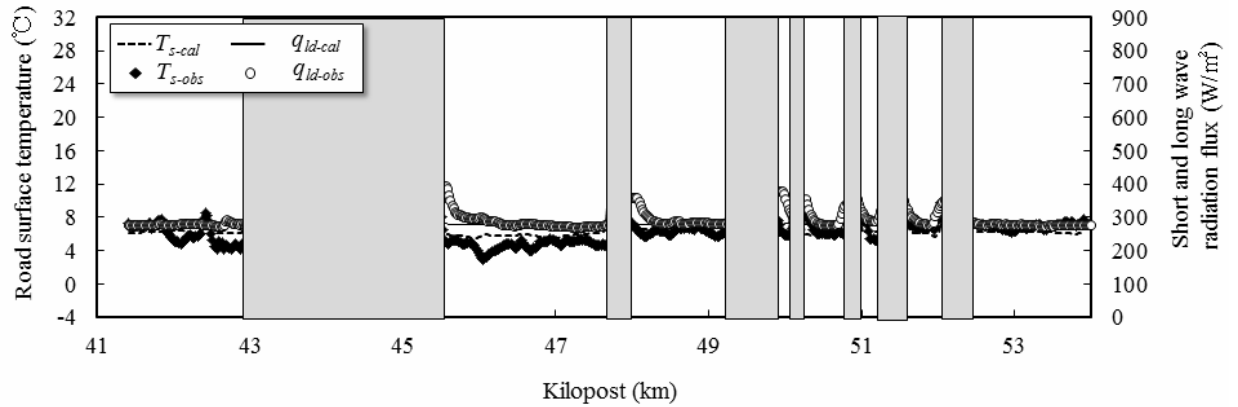


図 3-16 2010 年 11 月 11 日 21 : 00 における路面温度および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

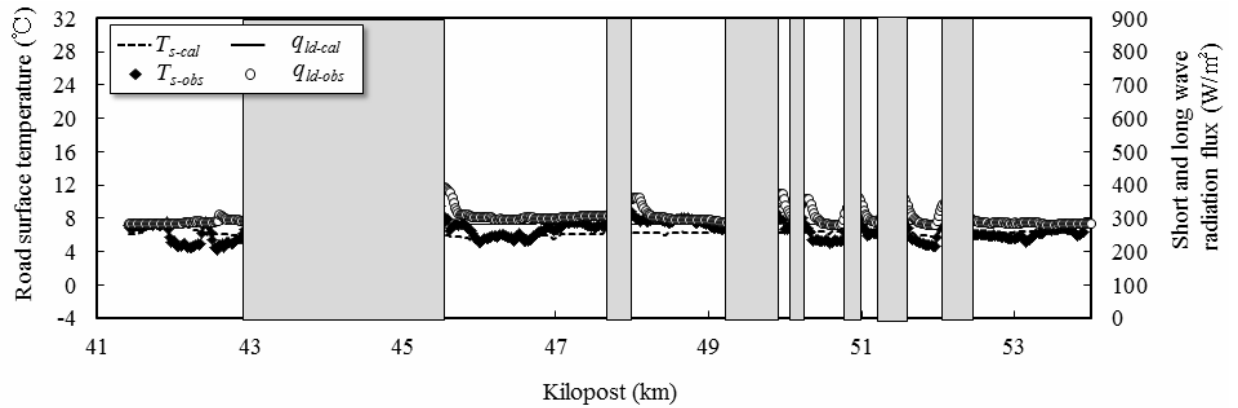


図 3-17 2010 年 11 月 12 日 0 : 00 における路面温度および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

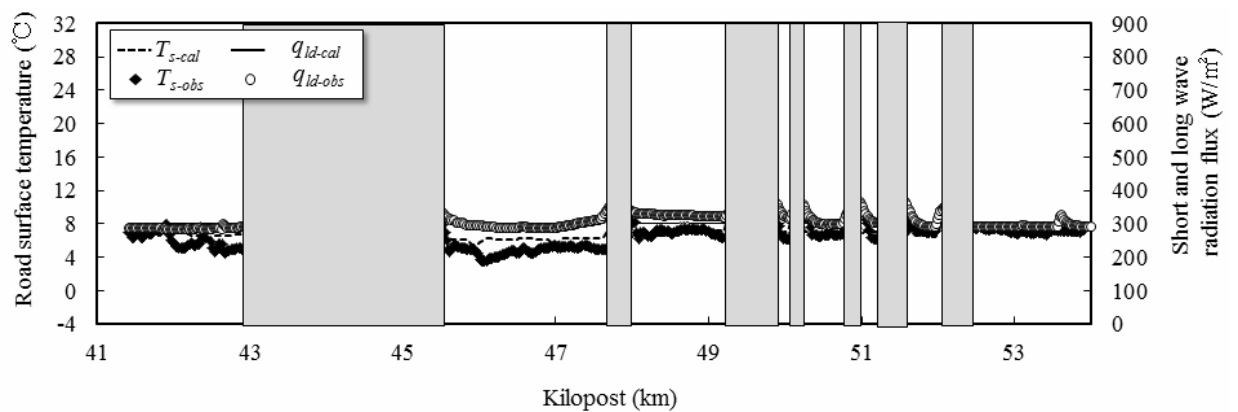


図 3-18 2010 年 11 月 12 日 3 : 00 における路面温度および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

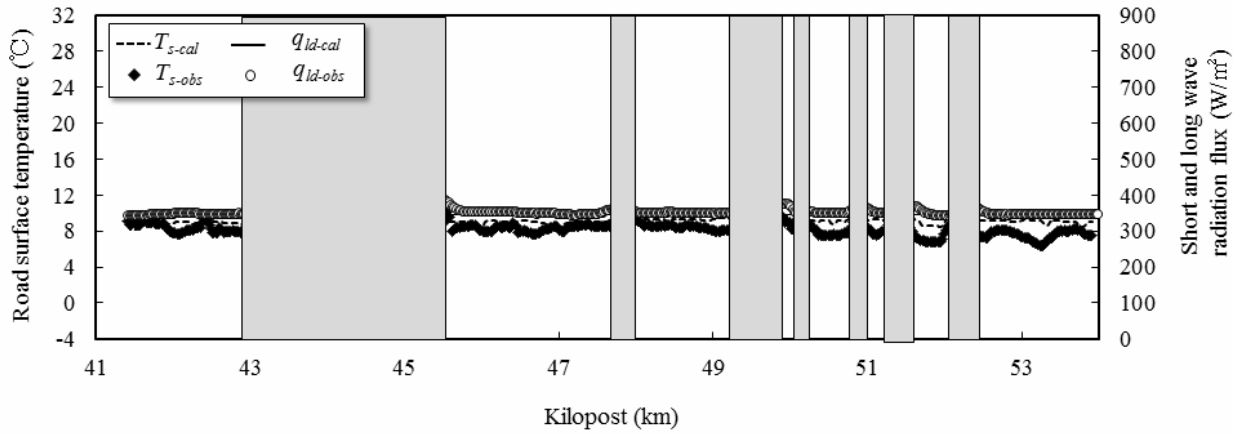


図 3-19 2010 年 11 月 12 日 6 : 00 における路面温度および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

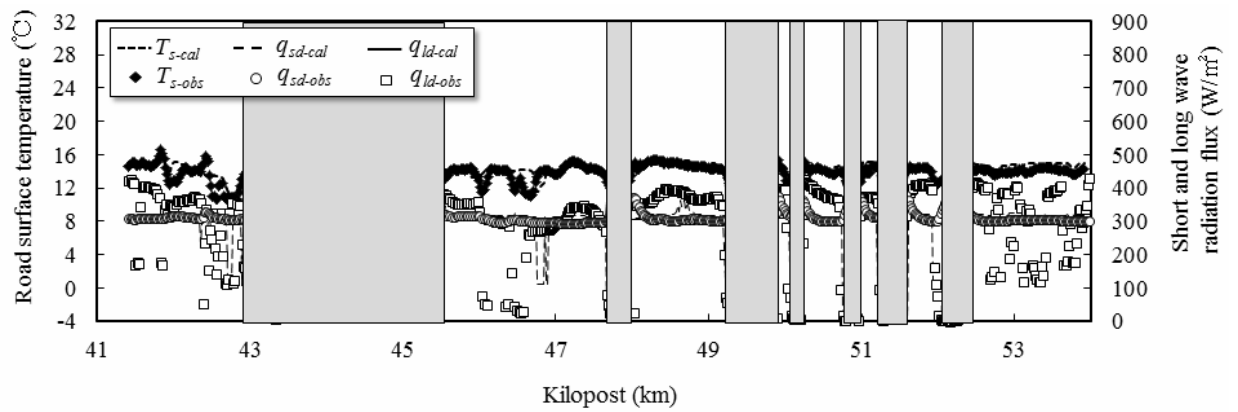


図 3-20 2010 年 11 月 12 日 9 : 00 における路面温度，日射および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

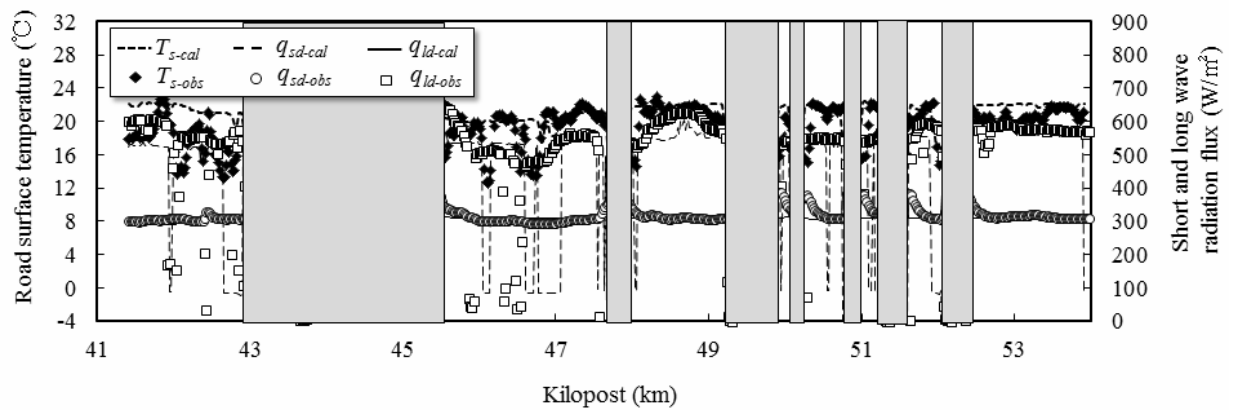


図 3-21 2010 年 11 月 12 日 12 : 00 における路面温度，日射および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

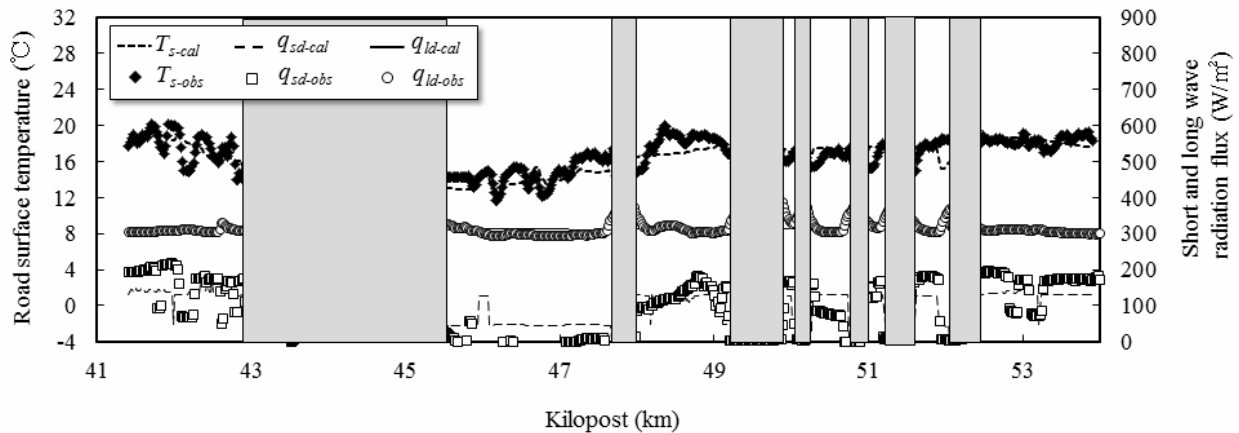


図 3-22 2010 年 11 月 12 日 15 : 00 における路面温度，日射および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

IC および山東 IC で計測された 24 時間交通量を用いた。なお，47.4 キロポストおよび 48.5 キロポスト付近には融雪システムが設置されているが，システム停止時は融雪舗装温度は通常舗装温度と同様の熱的挙動を示すため<sup>8)</sup>，融雪舗装の熱収支計算は通常舗装の熱収支計算手法を用いた。

計算は高速化手法を適用した場合(高速法)と適用しない場合(厳密法)についてそれぞれ行い，計算時間および計算精度を比較した

### 3.4.2 実測値と予測値の比較

図 3-7 から図 3-22 は 2010 年 11 月 10 日 18 : 00 から 11 月 12 日 15 : 00 までの 3 時間毎の  $T_s$ ， $q_{sd}$  および  $q_{ld}$  の実測値と計算値の路線変化を示す。 $T_s$  の実測値  $T_{s-obs}$  (図中◆) は 10°C から 18°C の範囲で大きく変化した。

図 3-14 は 11 月 11 日 15:00 の結果である。図中の 47 から 51 キロポスト付近および 54 キロポスト付近では， $T_s$  の計算値  $T_{s-cal}$  (図中点線) と  $T_{s-obs}$  はともに 16°C 前後で，その差は 0.5°C 未満であった。 $q_{sd}$  の計算値  $q_{sd-cal}$  (図中破線) と実測値  $q_{sd-obs}$  (図中□) および  $q_{ld}$  の計算値  $q_{ld-cal}$  (図中実線) と実測値  $q_{ld-obs}$  (図中○) もそれぞれ良好に一致したことから，日向・日陰判別および形態係数の計算は妥当で

あったと判断される。

図 3-14 の 46 キロポスト付近では，日中の大半が日陰となったことが原因で， $T_{s-obs}$  は約 13°C および  $q_{sd-obs}$  は約 50 W/m<sup>2</sup> となり，他の区間と比較して小さい値となった。 $q_{ld-obs}$  は 330 W/m<sup>2</sup> であった。一方， $T_{s-cal}$ ， $q_{sd-cal}$  および  $q_{ld-cal}$  はそれぞれ 12.1°C，40 W/m<sup>2</sup> および 325 W/m<sup>2</sup> となり，実測値とほぼ一致した。図 3-14 の 46.8 キロポスト付近では，同図の 46 キロポスト付近と同様に道路に隣接する山による日射遮蔽によって局所的に  $T_{s-obs}$  および  $q_{sd-obs}$  は 10.6°C および 45 W/m<sup>2</sup> のような小さな値が現れた。一方， $T_{s-cal}$  および  $q_{sd-cal}$  はそれぞれ 14.1°C および 193 W/m<sup>2</sup> であり，実測値より大きくなった。これは，山による日陰(約 30m)が，DSM の解像度(50m)以下で変化したために，日射遮蔽が正しく判別されなかったことに起因する。

42.0 キロポストから 43.0 キロポストの区間では，道路に隣接する樹木により日射がスパイク状に遮蔽されたために  $T_{s-obs}$  は 12°C から 16°C の範囲で， $q_{sd-obs}$  は 30 W/m<sup>2</sup> から 220 W/m<sup>2</sup> の範囲でそれぞれ大きく変化した。同区間における  $T_{s-cal}$  および  $q_{sd-cal}$  の計算値は 15~17°C および 50~220 W/m<sup>2</sup> となり， $T_s$  と  $q_{sd}$  をそれぞれ過大評価した。これは 46.8 キロポス

### 3. 広域路面温度予測モデル

ト付近と同様の理由(解像度の粗さ)により局所的な日陰が見落とされたことによる。

図 3-15 は 2010 年 11 月 11 日 18:00 における観測区間の  $T_s$  および  $q_{ld}$  の実測値と計算値を示す。トンネル坑口を除くと  $T_{s-obs}$  は路線に亘り 4℃から 8℃であり、図 3-14 のそれと比較して変動の幅は小さい。  $T_{s-cal}$  と  $T_{s-obs}$  の差も全区間にわたり 11 月 11 日 15:00 のそれより小さく、殆どの区間で  $T_{s-cal}$  と  $T_{s-obs}$  はほぼ一致した。他方、46.0 キロポストから 46.5 キロポストの区間では  $T_{s-cal}$  は  $T_{s-obs}$  より高く、最大で 2.2℃の差が生じた。これは、日中に生じた路面温度の誤差(過大評価)が日没後にまで引きずったことによる。その一例として、図 3-18(11 月 12 日 3:00)の 46 キロポスト付近が挙げられる。

#### 3.4.3 計算精度

表 3-1 は路面温度の区間平均誤差および空間的中率を測定時間別に表したものである。表中の  $\overline{\Delta T_s}$  (℃)は $|T_{s-cal} - T_{s-obs}|$ で与えられる任意地点での路面温度誤差  $\Delta T_s$  の区間平均値(1 時間当たり)を表す。空間的中率とは  $\Delta T_s < 1^\circ\text{C}$  または  $\Delta T_s < 2^\circ\text{C}$  が満たされた路線長を対象路線全長で除した割合(%)を意味する。計算対象期間を通した全地点での平均誤差  $\overline{\Delta T_s}$  は 1.5℃であり、 $\Delta T_s < 2^\circ\text{C}$  の空間的中率は 86%であった。また、日中(9:00~18:00)の  $\overline{\Delta T_s}$  は 1.9℃で、夜間(21:00~6:00)の  $\overline{\Delta T_s}$  (=1.2℃)より大きくなった。特に、11 月 11 日 12:00 および 11 月 12 日 12:00 の  $\overline{\Delta T_s}$  はそれぞれ 2.7℃と 2.9℃であり、他の時間帯と比較して大きい。この理由は、主に日射フラックスの予測誤差(日向および日陰の判別誤差)であり、地形の解像度が上がれば日中の計算精度は改善でき、夜間の計算精度向上にも繋がる。

#### 3.4.4 計算時間の短縮効果および計算精度に与える影響

表 3-2 は高速法と厳密法による 24 時間に亘

表 3-1 路面温度の区間平均誤差および空間的中率

日時	$\overline{\Delta T_s}$ および $\overline{\Delta T_s}$ (℃)	空間的中率 (%)	
		$\Delta T_s < 1^\circ\text{C}$	$\Delta T_s < 2^\circ\text{C}$
2010/11/10 18:00	1.3	69	84
21:00	1.2	47	93
11/11 0:00	1.3	64	85
3:00	1.3	55	83
6:00	1.5	36	78
9:00	2.3	55	78
12:00	2.7	59	74
15:00	1.6	53	84
18:00	1.1	63	93
21:00	1.1	64	95
11/12 0:00	1.1	60	94
3:00	1.1	67	94
6:00	1.1	56	97
9:00	0.9	80	94
12:00	2.9	44	65
15:00	1.2	53	91
全期間	1.5	58	86
全期間(日中)	1.9	55	81
全期間(夜間)	1.2	61	90

表 3-2 計算高速化適用時(高速法)および非適用時(厳密法)の計算時間比較

Combination of topographic elements	Exclusion of invisible elements	In elapsed CPU time (minutes)
Non	Non	263.4
Non	Inc.	195.6
Inc.	Inc.	11.4

る路面温度予測に要した計算時間  $t_c$  を比較したものである。地形面要素数の段階的結合に伴う地形面要素数削減および不可視面要素の計算除外を適用した場合、 $t_c$  は 11.4 分となり、厳密法(263.4 分)の 4.3% となった。また、不可視面要素の計算除外のみを適用した  $t_c$  は厳密法の 74% であった。これより、計算の高速化手法としては主に地形面要素数の削減が有効であることが知れる。

次に、計算高速化が路面温度の計算精度に及ぼす影響を検討する。高速法として地形面要素数の削減および不可視面要素の計算除外を適用した場合の  $\overline{\Delta T_s}$  は 1.53°C、不可視地形面要素の計算除外のみを適用した場合の  $\overline{\Delta T_s}$  は 1.52°C であった。一方、厳密法の  $\overline{\Delta T_s}$  は 1.52°C であり、高速法との間で  $\overline{\Delta T_s}$  の違いは生じなかった。また、 $T_s$  の路線分布も両手法で違いがなかった。

以上より、本論文で提案した計算高速化手法は、計算精度の低下を引き起こすことはないことが分かった。

### 3.5 数値予報データを用いた SAFF モデルの精度検証実験

2012 年 1 月 24 日から 25 日に亘り、数値予報データを気象入力条件として北近畿豊岡自動車道和田山 IC～青垣 IC 間の路線温度予測を行い、同時に行った路線温度、日射および長波放射フラックスの実測値と比較することで実際の運用条件下における SAFF モデルの路面温度予測精度検証を行った。以下に詳細を示す。

#### 3.5.1 実験および予測概要

(a) 路面温度、日射および長波放射フラックスの線的計測

$T_s$ 、 $q_{sd}$  および  $q_{ld}$  の線的計測は、3.4.1 で述べた手法で北近畿豊岡自動車道和田山 IC～青垣 IC 間において行った。計測は概ね 4 時間

半ごとに行われた。

(b) 路面温度、日射および長波放射フラックスの分布予測

広域気象モデルを用いて日射および長波放射フラックスの予測を行った。 $C_l$ 、 $C_m$ 、 $C_h$ 、 $C_{all}$  および  $T_a$  の分布は、気象庁が 2012 年 1 月 24 日 15:00 に発表したメソ数値予報モデル格子点値を用いた。また、 $T_{cl}$ 、 $T_{cm}$  および  $T_{ch}$  はそれぞれ地表面、850hPa 等圧面および 500hPa 等圧面における気温予報格子点値を用いた。 $p$  は実験地から最も近い米子において 1 月に計測された値(=0.75)を用いた<sup>7)</sup>。 $T_s$  の初期路線分布は、2012 年 1 月 23 日 15:00 に発表されたメソ数値予報モデル格子点値を基に 24 時間に亘り路面温度計算を行い(助走計算)、得られた値を用いた。本計算では、DSM として国土地理院が発行する 50m メッシュ数値標高地図を用いた。



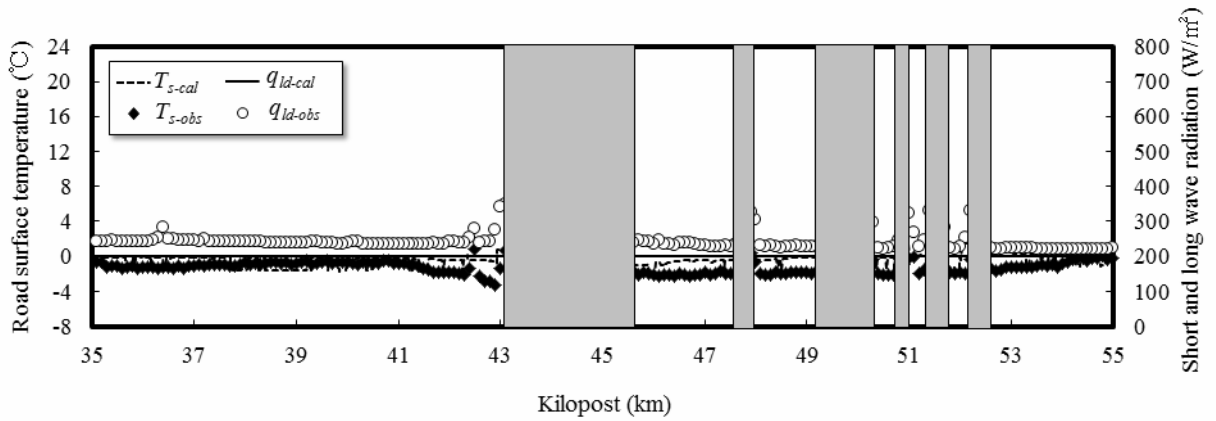


図 3-23 2012 年 1 月 24 日 18 : 00 における路面温度および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

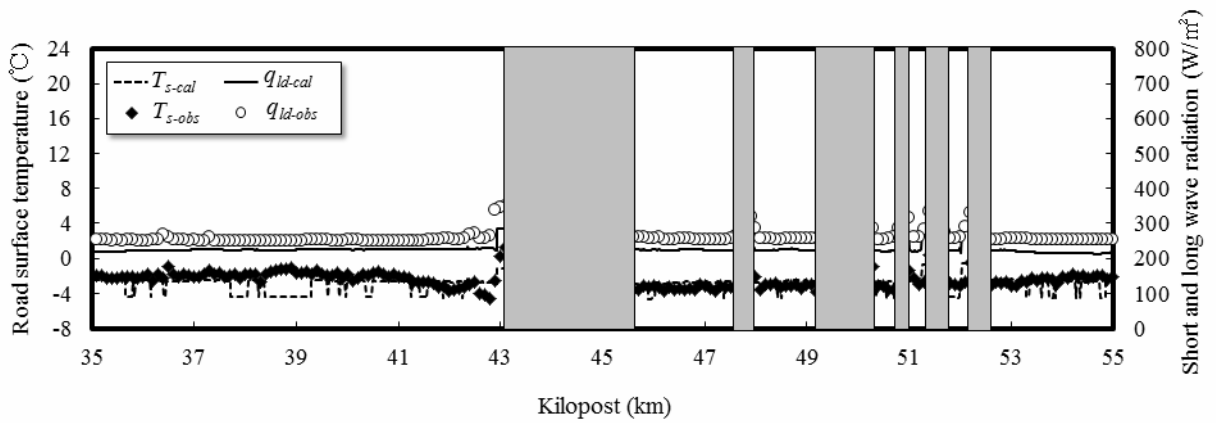


図 3-24 2012 年 1 月 24 日 22 : 30 における路面温度および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

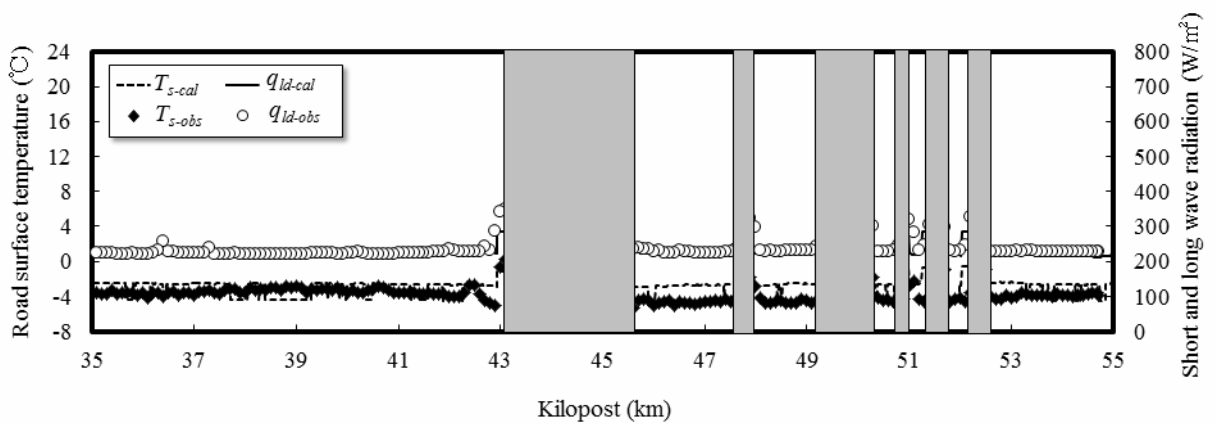


図 3-25 2012 年 1 月 25 日 3 : 30 における路面温度および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

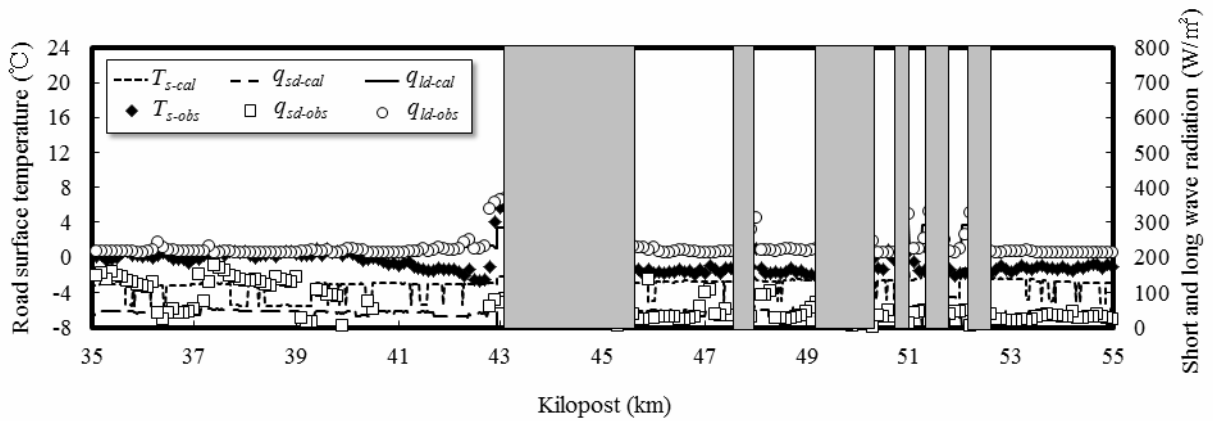


図 3-26 2012 年 1 月 25 日 7 : 30 における路面温度，日射および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

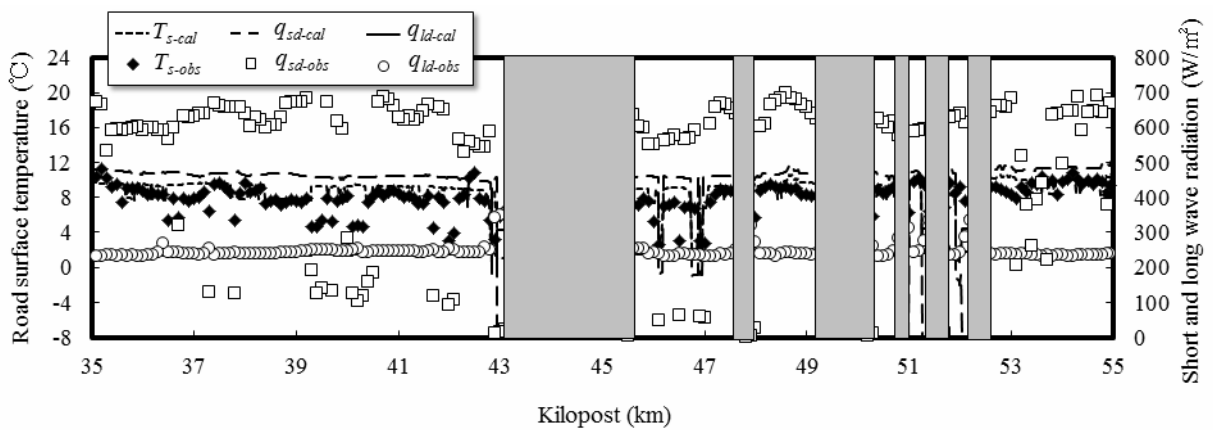


図 3-27 2012 年 1 月 25 日 12 : 00 における路面温度，日射および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

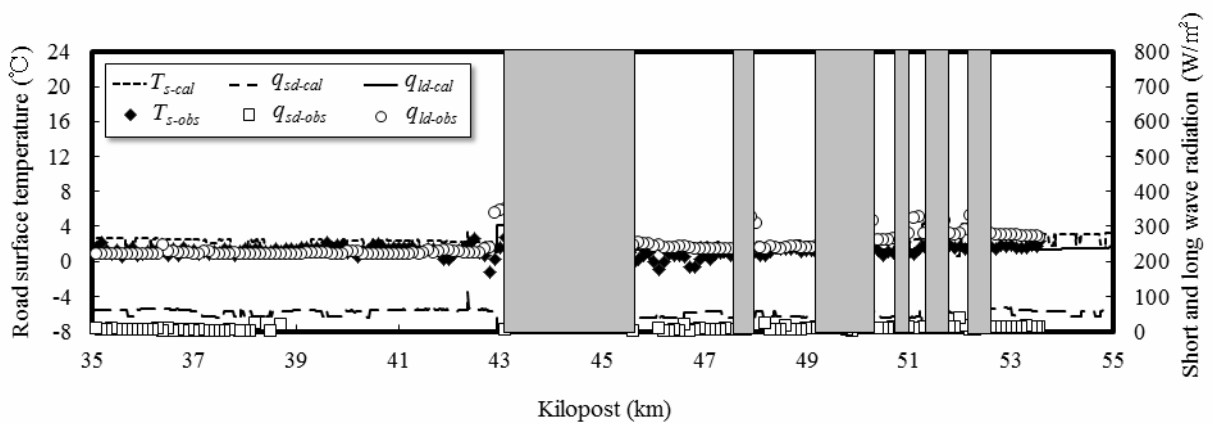


図 3-28 2012 年 1 月 25 日 16 : 30 における路面温度，日射および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>



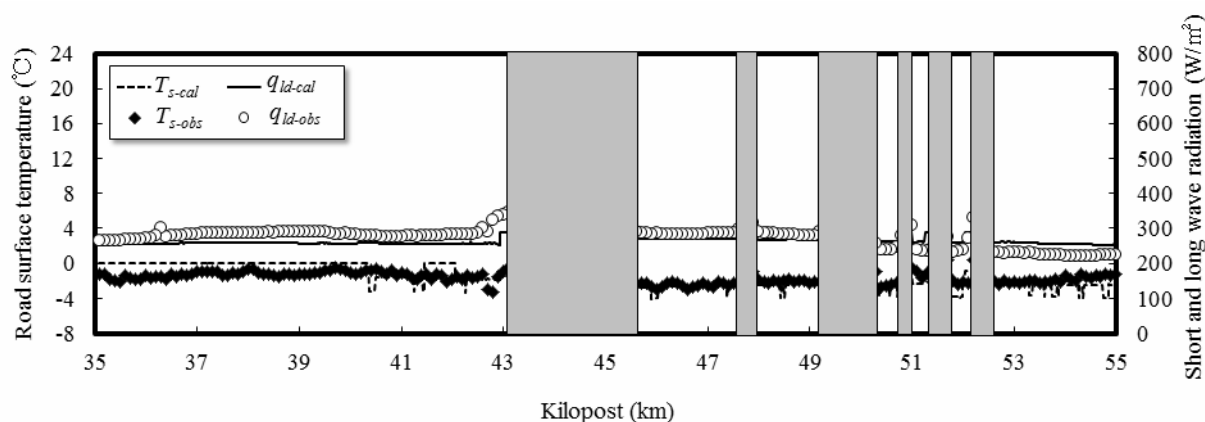


図 3-29 2012 年 1 月 25 日 21 : 00 における路面温度および長波放射フラックスの実測値および予測値<sub>T</sub>

表 3-3 路面温度の区間平均誤差および空間的中率

日時	$\overline{\Delta T_s}$ および $\overline{\Delta T_s}$ (°C)	空間的中率 (%)		0°C分割 的中率 (%)	過大評価率 (%)	過小評価率 (%)
		$\Delta T_s < 1^\circ\text{C}$	$\Delta T_s < 2^\circ\text{C}$			
2012/1/24 18:00	1.2	48	96	88	11	1
22:30	1.2	73	87	99	0	1
1/25 3:30	2.3	24	72	95	0	5
7:30	3.1	15	44	68	0	32
12:00	2.0	46	79	100	0	0
16:30	1.2	49	93	95	5	0
21:00	1.2	59	90	84	0	16
全期間	1.8	45	80	90	2	8
全期間(日中)	2.1	37	72	88	2	10
全期間(夜間)	1.5	51	86	92	3	5

### 3.5.2 実測値と予測値の比較

図 3-23 から図 3-29 に実験期間中の  $T_s$ ,  $q_{sd}$  および  $q_{la}$  の実測値と予測値の空間変化を示す。1 月 25 日 7 : 30 にはほぼすべての区間において  $T_{s-cal}$  は  $T_{s-obs}$  より 2°C から 3°C 低くなった。これは  $T_a$  の予測値が実測値よりも低く、路面から大気への伝達熱量を過大に見積もったためと推察される。同日 12 : 00 以降は

気象予報値と実測値の差は小さくなり、 $T_{s-cal}$  と  $T_{s-obs}$  もおおむね一致した。

表 3-3 は  $T_s$  の区間平均誤差、空間的中率を測定時間別に表したものである。同表には  $T_{s-cal}$  と  $T_{s-obs}$  が共に 0°C 以上または 0°C 未満であった区間長の全区間長に対する割合 (0°C 分割的中率  $p_a$ )、 $T_{s-cal} > 0^\circ\text{C}$  かつ  $T_{s-obs} \leq 0^\circ\text{C}$  であった区間長の全区間長に対する割合 (過大

評価率  $p_o$ ),  $T_{s-cal} \leq 0^\circ\text{C}$  かつ  $T_{s-obs} > 0^\circ\text{C}$  であった区間長の全区間長に対する割合(過小評価率  $p_u$ )をそれぞれ示す. 予測対象期間を通した全地点での平均誤差  $\overline{\Delta T_s}$  は  $1.8^\circ\text{C}$  であった. これは 3.4 で述べた気象実測値を用いた場合のそれと比較して  $0.3^\circ\text{C}$  大きい. また,  $\Delta T_s < 2^\circ\text{C}$  の空間的中率も 80% となり, 気象実測値を用いた場合と比較して 6% の低下が見られた.

$p_a$  は 1 月 25 日 7:30 を除くすべての時間帯で 80% を上回った. 1 月 25 日 7:30 には,  $T_s$  を全体的に低く予測したため  $p_a$  は 68% まで低下し,  $p_u$  は 32% まで増加した.  $p_o$  は全ての時間帯で低く,  $p_o$  の全期間平均値は 2% であった. このことから, SAFF モデルを凍結防止剤散布時期の判断に利用した場合, 概ね適正なタイミングで凍結防止剤散布を行うことができるが, 路面温度予測に失敗した場合は凍結防止剤が過剰に散布される可能性があると考えられる.

### 3.6 おわりに

本章では, DSMを用いた新しい広域路面温度予測モデル(SAFFモデル)を提案するとともに, 実際の道路管理を念頭に計算の高速化と精度について検討した. そのために, 兵庫県北近畿豊岡自動車道において野外観測を行った. 路面温度のみならず, 今まで評価されてこなかった日射フラックスおよび長波放射フラックスについても, 実測値と計算値の路線分布からSAFFモデルを詳細に評価した.

以下に得られた知見を列挙する.

- (1) SAFFモデルによる路面温度誤差  $\Delta T_s$  の観測期間に亘る空間平均誤差は  $1.5^\circ\text{C}$  であり, 実際の路面温度を精度よく計算することができた. また,  $\Delta T_s < 1^\circ\text{C}$  の空間的中率は 58%,  $\Delta T_s < 2^\circ\text{C}$  のそれは 86% であった.
- (2) 日射フラックスの計算値は路線の大部分で実測値と概ね一致し, 山岳による日射遮蔽を正しく計算することができた.
- (3) 50mメッシュのDSMでは樹木や沿道山岳

による局所的な日陰を表現することは困難であり, 日向および日陰の判別ミスで路面温度計算値は  $2^\circ\text{C}$  以上の誤差が生じた.

- (4) 地形面要素数の削減および不可視地形面要素の計算除外による計算高速化手法を用いることで, 計算精度を低下させることなく計算時間を 1/23 に短縮できた.
- (5) (4)により, 当該路線では現状から1時間後の路線温度予測(計算が1時間以内で完了すること)が可能になった.
- (6) SAFFモデルの気象入力条件に数値予報データを用いた場合, 路面温度予測精度はやや低下するものの平均誤差は  $1.8^\circ\text{C}$  であり, 概ね良好に路面温度の予測が可能である.

#### 参考文献

- 26) 齊田光, 藤本明宏, 福原輝幸: 熱収支法による広域路面温度予測モデルー乾燥路面の路線温度分布予測ー, 土木学会論文集, 登載決定
- 27) 渡邊洋, 藤本明宏, 福原輝幸: 通過車両から路面への熱供給に関するモデリング, 寒地技術論文・報告集, Vol. 21, pp. 195-200, 2005.
- 28) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸: 車両熱のモデリングと乾燥路面温度への影響評価, 土木学会論文集, Vol. 63, No. 2, pp. 250-261, 2007.
- 29) 山田昇, 信田知暁, 滝沢寛之: ヘミスフィア法による形態係数の高速算出性能, 日本機械学会論文集, Vol.75, No.749, pp.132-139, 2009.
- 30) 吉田伸治, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三, 富永禎秀, 大森敏明: 対流・放射・湿気連成解析による屋外環境共生空間の解析その 1 モンテカルロ法を用いた放射計算の概要, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.301-304, 1997.
- 31) 田中俊六, 武田仁, 岩田利枝, 土屋喬雄, 寺尾道仁: 最新建築環境工学, 2006.
- 32) 文部省国立天文台: 理科年表机上版, Vol. 74, 2001.
- 33) Akira Saida, Akihiro Fujimoto, Teruyuki Fukuhara : Performance of snow-melting system with two ground-heat extraction systems, proceedings of IS2012 international conference, 2012

## 本章で用いた記号

$\overline{\Delta T_s}$	: 路面温度誤差の区間平均値	( $^{\circ}\text{C}$ )
$(\rho c)_s$	: 道路表層の体積熱容量	( $\text{J}/\text{m}^3\text{K}$ )
$C_{all}$	: 全雲量	(-)
$C_h$	: 高層雲量	(-)
$C_l$	: 下層雲量	(-)
$C_m$	: 中層雲量	(-)
$R$	: 四角形面要素	(-)
$R_M$	: 結合された四角形面要素	(-)
$R_{adj}$	: 頂点座標の補正が必要な四角形面要素	(-)
$T_a$	: 気温	( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{ch}$	: 高層雲の雲底絶対温度	( $\text{K}$ )
$T_{cl}$	: 低層雲の雲底絶対温度	( $\text{K}$ )
$T_{cm}$	: 中層雲の雲底絶対温度	( $\text{K}$ )
$T_{s-1}$	: 道路表層下面に隣接する道路要素 $s-1$ の温度	( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{s-cal}$	: 路面温度の計算値	( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{s-obs}$	: 路面温度の実測値	( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_v$	: 車両底面温度	( $^{\circ}\text{C}$ )
$V_w$	: 自然風または車両誘発風速	( $\text{m}/\text{sec}$ )
$al_s$	: 路面のアルベド	(-)
$d_{s,s-1}$	: 道路表層要素と要素 $s-1$ の重心間距離	( $\text{m}$ )
$f_{ij}$	: 道路面要素 $E_{ri}$ と地形面要素 $E_{sj}$ 間の形態係数	(-)
$h$	: 舗装－大気間の熱伝達率	( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )
$l_{ab}$	: 辺 $ab$ の長さ	( $\text{m}$ )
$l_{av}$	: $R_M$ の頂点 $a$ から $v_{adj}$ までの距離	( $\text{m}$ )
$p_a$	: 路面温度の $0^{\circ}\text{C}$ 分割的中率	(%)
$p_o$	: 路面温度の過大評価率	(%)
$p_u$	: 路面温度の過小評価率	(%)
$q_{as}$	: 車両誘発風および自然風による顕熱フラックス	( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_c$	: 舗装および土壌の熱伝導フラックス	( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{cs}$	: 路面熱伝導フラックス	( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{ld}$	: $E_r$ へ入射する長波放射フラックス	( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{ld-cal}$	: 長波放射フラックスの計算値	( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{ld-obs}$	: 長波放射フラックスの実測値	( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{lds}$	: 路面に入射する長波放射フラックス	( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{lus}$	: 路面からの長波放射フラックス	( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{sd}$	: $E_r$ へ入射する日射フラックス	( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{sd-cal}$	: 日射フラックスの計算値	( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{sd-obs}$	: 日射フラックスの実測値	( $\text{W}/\text{m}^2$ )

### 3. 広域路面温度予測モデル

---

$q_{sds}$	: 路面に入射する日射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$r$	: 道路面要素－地形面要素間の距離	(m)
$r_s$	: 地形面要素の結合基準距離	(m)
$s$	: <i>Stefan-Boltzmann</i> 定数	(W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
$t$	: 時間	(sec)
$t_c$	: 24 時間の路面温度計算に要した時間	(min.)
$t_{vp}$	: 任意の時間 $t$ の間に車両が $E_r$ の重心上を通過する時間	(sec)
$v_{adj}$	: $R_{adj}$ の共通頂点	(-)
$z_1$	: $R_M$ の頂点の標高	(m)
$z_2$	: $R_M$ の頂点 $b$ の標高	(m)
$z_s$	: 道路表層厚	(m)
$z_{v-adj}$	: $v_{adj}$ の標高	(m)
$\Delta T_s$	: 任意地点での路面温度誤差	(°C)
$\varepsilon_v$	: 車両底面の射出率	(-)
$\lambda_p$	: 道路表層の熱伝導率	(W/mK)

## 4. 広域路面温度予測モデルの精度改善

### 4.1 はじめに

第1章で述べたように、より迅速な冬期道路管理を行うための手法の1つとして、路面温度予測モデル(RSTF モデル)は適切なタイミングでの凍結防止剤散布や除雪実施に対する基本的情報を与えることが出来る。路面温度は天候による気温、日射および長波放射フラックスの変動といった自然要因、沿道地物による日射の遮蔽や反射、輻射といった地形的要因および車両通過に伴う風速の変化や日射の遮蔽といった人為的要因などによって左右される<sup>1)</sup>。このうち、自然要因および地形的要因は第2章で構築した広域気象モデルにより良好な精度で考慮することが可能となった。

本章では、実際の冬期道路管理で必要とされる迅速な路面温度予測が可能となるように、SAFFモデルの計算高速化と予測精度維持の両立を試みる。さらに、北近畿豊岡自動車道において路面温度の線的計測を行い、SAFFモデルによる予測結果と比較することで、構築したモデルの予測精度および改良が必要な点を明らかにする。

### 4.2 航空レーザ測量データ(LPデータ)を用いた広域路面温度予測の高精度化

#### 4.2.1 はじめに

路線に亘る路面温度(路線温度)を予測する広域路面温度予測モデルは、冬期道路管理(機械除雪や凍結防止剤散布など)を行う際意思決定支援ツールとして期待され、研究開発が進められている<sup>1)~4)</sup>。齊田ら<sup>5)</sup>は、SAFFモデルの妥当性を検証するために、山間地域の路線(13km)を対象として日射フラックスおよび路

線温度の観測値と計算値を比較した。その結果、SAFFモデルによる誤差が2℃以下の区間は全体の86%、および誤差1℃以下の区間は全体の58%であった。また、小規模な沿道地物が存在する区間において、日射フラックスの誤差が大きくなることが示された。この原因は、計算に用いたデジタル地表モデル(DSM)の解像度50mでは表現できない沿道の小さな地形変化や構造物)による日向・日陰の形状誤差であった。解像度が高いDSMの使用は計算誤差を小さくするが、計算時間の増大につながる<sup>6)</sup>。山村ら<sup>7)</sup>はDSM解像度が高くなるに従い計算時間が指数関数的に増大することを示した。

従って、SAFFモデルによる冬期道路管理を実施しようとするれば、計算時間(路線温度の更新時間)と計算精度を満足させるような解像度の地形データの選定が重要となる。しかしながら、DSMの解像度が路線温度および日射フラックスの路線変化の計算精度に及ぼす影響を定量的に議論した研究は、今までにない。

そこで本研究では、航空レーザ測量データ(LPデータ)を用いてDSMの解像度を変化させ、路線温度および日射フラックスの計算結果とサーマルマッピングの結果を比較し、DSMの解像度が計算精度と計算時間に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

#### 4.2.2 気象およびサーマルマッピングの概要

福井県福井市合谷町において、地形データ解像度が路面温度予測精度に与える影響を調べるためにサーマルマッピングを行った。加えて、定点気象観測も行った。以下にその詳細を示す。

#### 4. 広域路面温度予測モデルの精度改善

##### a) 気象定点観測

福井大学工学部 1 号館屋上に気象ステーションを設置し, 気象観測を 2011 年 11 月 4 日 9:00 から 24 時間に亘り行った.

図 4-1 は使用した気象観測装置を示す. 全天日射フラックス  $q_{sd}$  および長波放射フラックス  $q_{ld}$  は地上 10m に設置された放射収支計 (Kipp&Zonen CNR 1) により, 気温  $T_a$  および大気の相対湿度  $RH_a$  は地上 10m に設置された温湿度計 (Vaisala HMP 45A) により, 風速  $V_w$  は地上 10.5m に設置された三杯式風速計 (Davis Wizard III) により, それぞれ計測した. 散乱日射フラックス  $q_{sdf}$  および直達日射フラックスが全天日射フラックスに占める割合  $p_{dif}$  は, 自動回転式シャドウブレードと全天日射計 (Kipp&Zonen CMP 3) を用いて求めた.

##### b) サーマルマッピング

放射収支計 (Kipp&Zonen CPR-PCM-01L) および放射温度計 (Raytek MI3) を搭載した車両 (サーマルマッピング車両, 図 4-2 を参照) を用いて図 4-3 に示す対象路線 (3.4km) を走行し,  $q_{sd}$ ,  $q_{ld}$  および路面温度  $T_s$  を約 1m 間隔で計測した. 放射収支計は, 車両上部 (地上 2.0m) に水平に設置した. また, 放射温度計は車両前部 (地上 0.5m) に路面と鉛直になるように設置するとともに断熱材で覆い, 外気温が  $T_s$  の測定結果に与える影響を抑えた. サーマルマッピングは測定期間中, 3 時間毎に行われた.

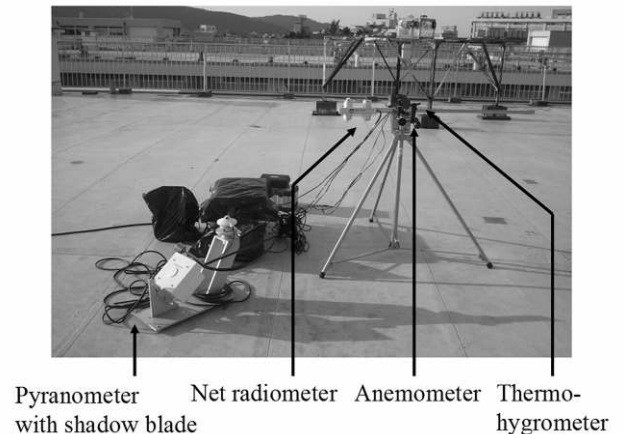


図 4-1 定点気象観測に用いた装置

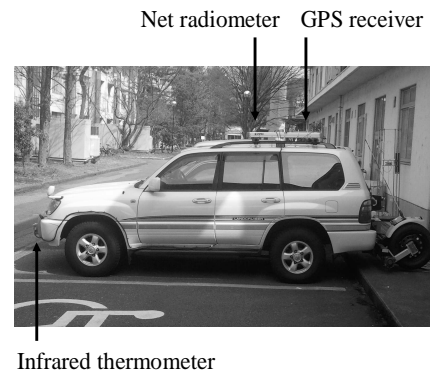


図 4-2 サーマルマッピング車両の概要

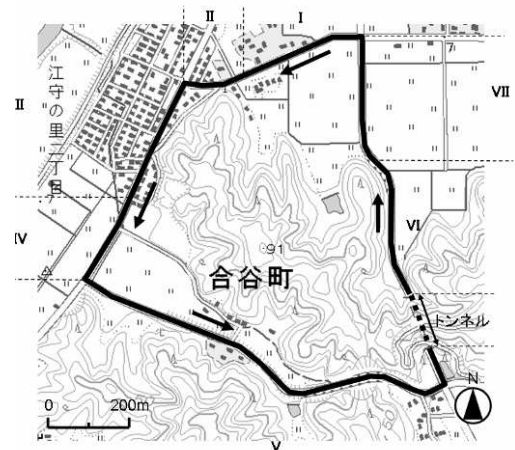


図 4-3 線的計測の実施区間

#### 4. 広域路面温度予測モデルの精度改善

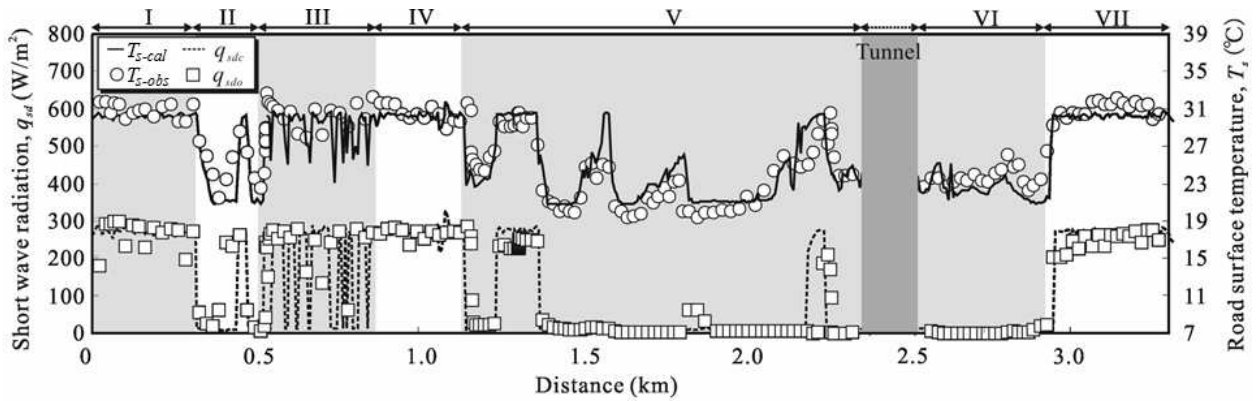


図 4-4 2011 年 11 月 4 日 15 : 00 における路面温度および日射フラックスの分布（地形解像度 3m）

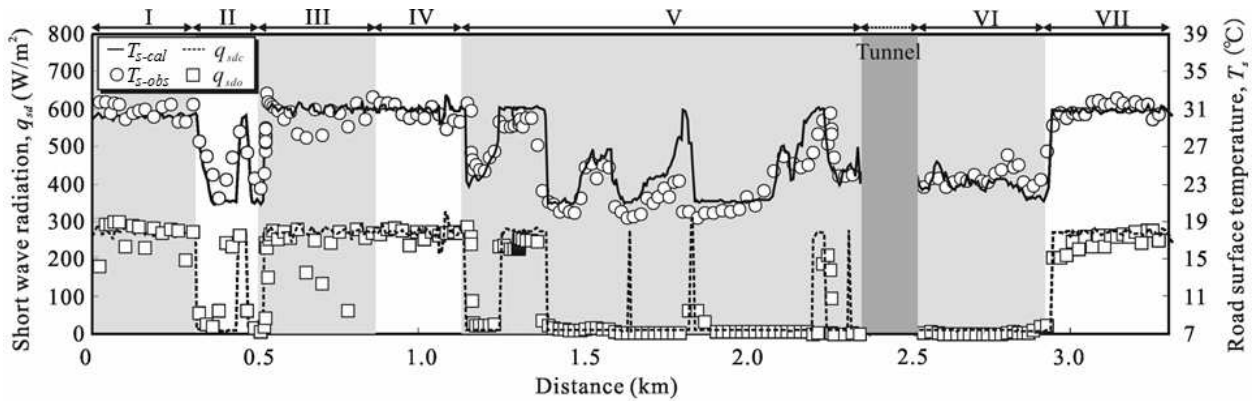


図 4-5 2011 年 11 月 4 日 15 : 00 における路面温度および日射フラックスの分布（地形解像度 5m）

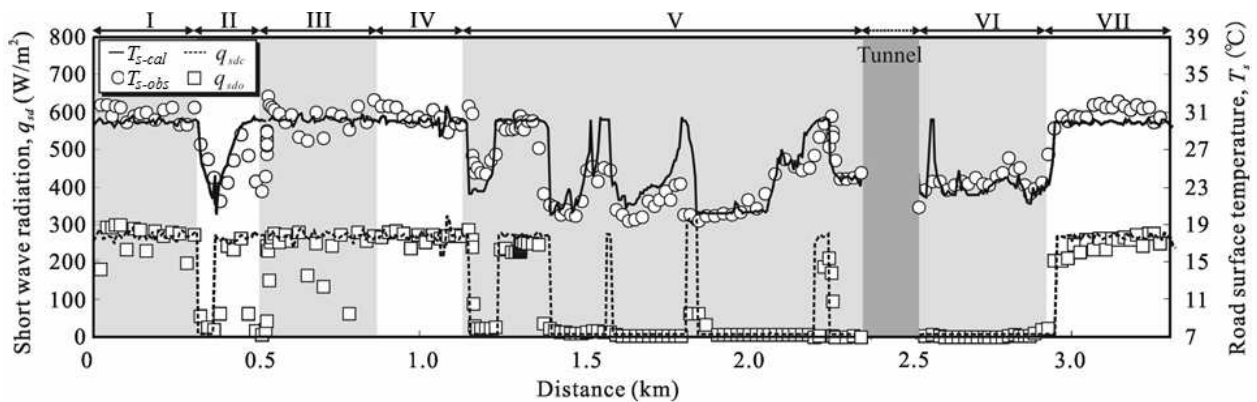


図 4-6 2011 年 11 月 4 日 15 : 00 における路面温度および日射フラックスの分布（地形解像度 10m）



#### 4. 広域路面温度予測モデルの精度改善

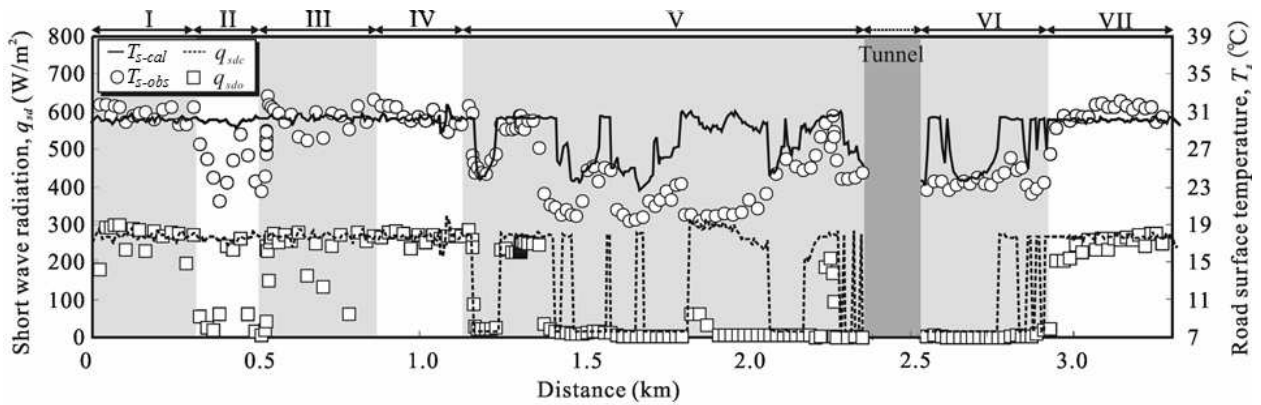


図 4-7 2011 年 11 月 4 日 15:00 における路面温度および日射フラックスの分布（地形解像度 20m）

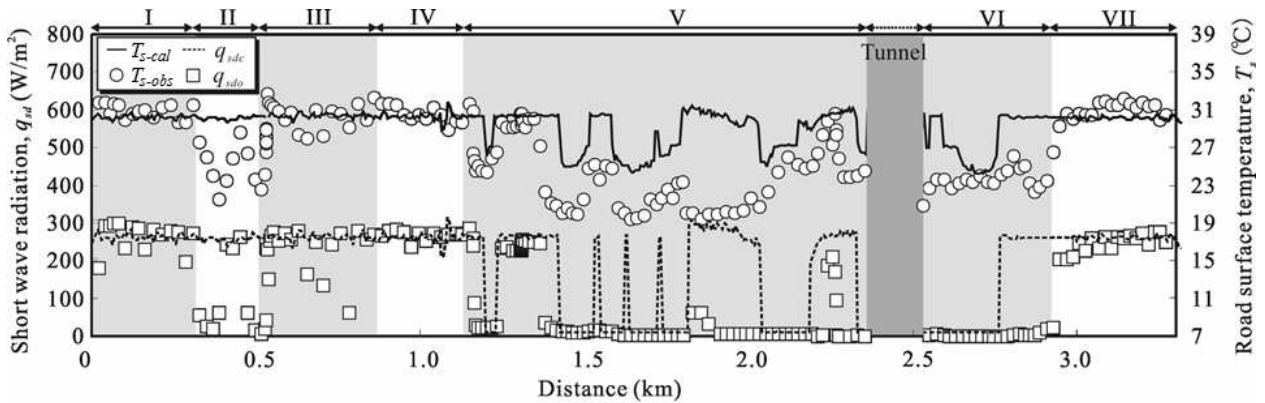


図 4-8 2011 年 11 月 4 日 15:00 における路面温度および日射フラックスの分布（地形解像度 30m）

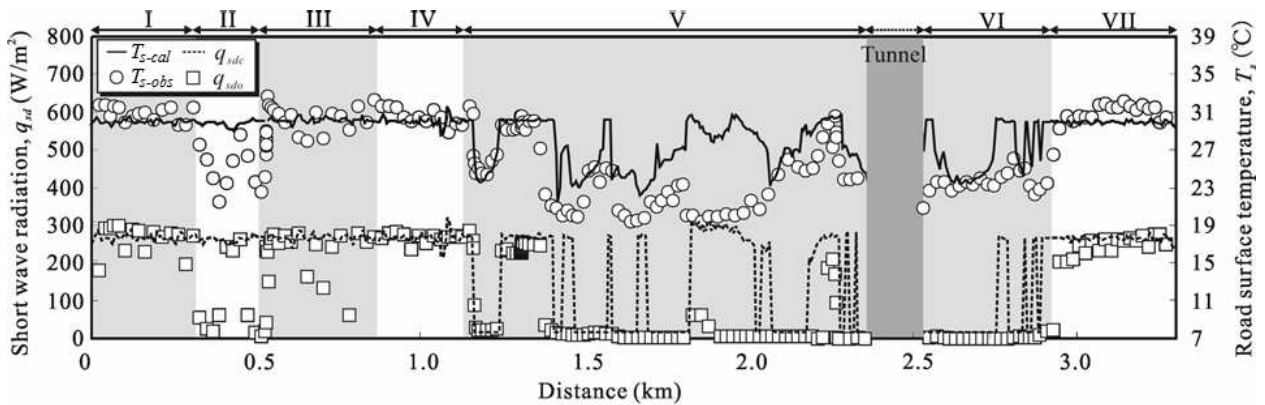


図 4-9 2011 年 11 月 4 日 15:00 における路面温度および日射フラックスの分布（地形解像度 50m）

## 4.2.3 計算条件

計算は対象路線のうちトンネル(図 4-3の点線部)を除く区間とし、上述した測定期間に亘り行った。道路要素は約 5m の長さとし、道路要素毎に路面温度、日射フラックスおよび天空長波放射フラックスを求めた。計算領域は対象路線から1km遠方までの範囲とし、地形要素は地形解像度 $L = 3\text{m}, 5\text{m}, 10\text{m}, 20\text{m}, 30\text{m}$ および $50\text{m}$ のLPデータを用いて作成した。なお、用いたLPデータの空間分解能は1mおよび距離精度は0.15mである。

本計算ではSAFFモデルの精度を検証する目的で、路線の各地点における道路気象データ( $T_a$ ,  $V_w$ ,  $q_{sdr}$ ,  $q_{sdf}$ および $q_{ld}$ )は、気象ステーションまたはサーマルマッピングで得られた実測値を与えた。任意時刻の道路気象データは、その前後の測定値を線形補完した。

全区間に亘る舗装および地盤温度の計算に際して、アスファルト舗装厚は0.05m、地盤は一樣とし、底部境界条件は、2005年11月に福井大学構内で観測した結果を基に、路面下2mで $12^\circ\text{C}$ 一定とした。計算対象深さは路面から2mまでの深さとし、計算メッシュの分割数は40(路面下0.5mまでメッシュ厚さ20mm、それ以深でメッシュ厚さ100mm)とした。また、 $T_s$ の初期値は11月4日9:00のサーマルマッピングデータを与えた。任意の $E_r$ における初期温度鉛直分布 $T(z)$ は、同地点の $T_s$ および上記の観測で得られた鉛直温度分布形が全区間に適用できるとして、式(4-1)のように与えた。

$$T(z) = \{T_s - T_0(0)\} \left( \frac{2+z}{2} \right) + T_0(z) \quad (-2 \leq z \leq 0) \quad (4-1)$$

ここに、

$T_0(z)$  : 福井大学構内における  
温度鉛直分布  
( $^\circ\text{C}$ )

$z(<0)$  : 地表面からの深さ  
(m)

である。

なお、交通量は2010年道路交通センサスに

より福井市南居町で計測された24時間交通量を用いた。

## 4.2.4 観測値と計算値の比較

図 4-4から図 4-9は、2011年11月4日15:00における $T_s$ の観測値 $T_{s-obs}$ (図中○)と計算値 $T_{s-cal}$ (図中実線)および $q_{sd}$ の観測値 $q_{sd-obs}$ (図中□)と計算値 $q_{sd-cal}$ (図中破線)をR毎にそれぞれ示す。なお、図中濃灰色の区間はトンネルを示す。沿道地物および土地利用状況から対象路線を区間Ⅰ(平地)、区間Ⅱ(低層市街地)、区間Ⅲ(低層市街地および街路樹)、区間Ⅳ(平地)、区間Ⅴ(山地)、区間Ⅵ(山地と平地の混在)および区間Ⅶ(平地)の7つに分け、計算結果を区間ごとに考察する。

観測期間中の天候は11月4日12:00から11月5日0:00までは快晴で、11月5日6:00以降は曇りであった。

図 4-10は気象ステーションで計測した $T_a$ 、 $q_{sd}$ および $q_{ld}$ の経時変化を示したものであり、急激な変化は認められなかった。

## a) 日射フラックス

まず  $q_{sd-obs}$  の空間分布に着目する。平地(沿道地物がない)区間Ⅰ、区間Ⅳおよび区間Ⅶの $q_{sd-obs}$ は約 $280\text{W}/\text{m}^2$ でほぼ一定であった。他方、山地が隣接する区間Ⅴおよび区間Ⅵでは始点から1.3km付近および2.2km付近を除く箇

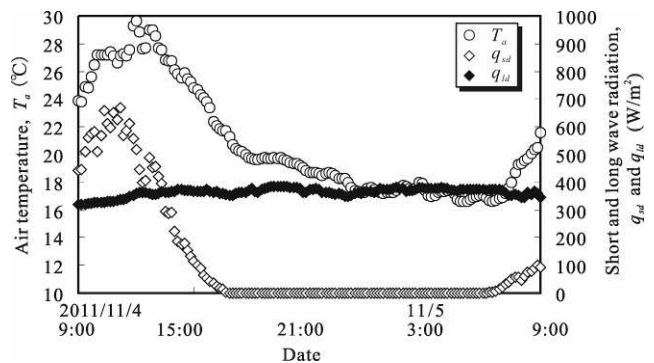


図 4-10 定点気象観測地点における気温、日射フラックスおよび長波放射フラックスの経時変化

#### 4. 広域路面温度予測モデルの精度改善

所で日陰となり、 $q_{sd-obs}$  は  $15\text{W/m}^2$  程度であった。図では分かり難いが、区間 II では沿道地物による日射遮蔽に伴い、 $q_{sd-obs}$  は  $10\text{m}$  程度の間隔で大きく変化した。日陰の  $q_{sd-obs}$  は約  $20\text{W/m}^2$  であり、区間 V および区間 VI のそれとほぼ同じであった。区間 III の沿道地物に加え、街路樹によって日射が局所的に遮蔽される箇所が存在した。そのため  $q_{sd-obs}$  は  $60\text{W/m}^2$  から  $260\text{W/m}^2$  の間で不規則に変動した。

次に、 $q_{sd-cal}$  の空間分布に着目する。 $L=3\text{m}$  の  $q_{sd-cal}$  は区間 III を除いて概ね  $q_{sd-obs}$  と一致した。区間 III では、 $q_{sd-cal}$  は  $260\text{W/m}^2$  前後あるいは  $10\text{W/m}^2$  前後の値を取り、 $q_{sd}$  の計算誤差  $\Delta q_{sd}(=|q_{sd-cal}-q_{sd-obs}|)$  が  $100\text{W/m}^2$  を超える箇所が散在した。この誤差の理由として、SAFF モデルでは樹木などによる日射の部分的な透過を考慮していないことが挙げられる。 $L=5\text{m}$  の  $q_{sd-cal}$  は  $R=3\text{m}$  のそれと大きな違いはないが、区間 V の一部 ( $1.6\text{km}$ ) で  $q_{sd-cal}$  が過大評価されたり、区間 III では  $q_{sd-obs}$  の大きな変動が消えた。 $L=10\text{m}$  の  $q_{sd-cal}$  は、 $L=5\text{m}$  のそれとほぼ同じ傾向であったが、区間 II では沿道地物の形状を正確に表現できなかったために、 $0.45\text{km}$  から  $0.5\text{km}$  の区間で過大評価された。また、区間 V および VI でも局所的に過大評価があった。 $L=20\text{m}$ 、 $30\text{m}$  および  $50\text{m}$  の  $q_{sd-cal}$  は、地形およ

び密集した樹木の形状を正確に表現できなかったために区間 V および区間 VI で、 $L \leq 10\text{m}$  のそれとは異なる分布 (誤差) が生じた。

以上のように  $q_{sd}$  の誤差は区間毎に違いが認められ、主として沿道地物等の形状が正確に表現されなかったことに起因することが確認できた。

##### b) 路線温度

$T_{s-obs}$  の路線分布に着目すると、平地区間 I、IV および VII の  $T_{s-obs}$  は約  $32^\circ\text{C}$  でほぼ一定であった。山地が隣接する区間 V および VI では、 $T_{s-obs}$  の最低値は  $19.4^\circ\text{C}$  および最高値は  $30.6^\circ\text{C}$  であり、 $11.2^\circ\text{C}$  の差が見られた。区間 II および III では、沿道地物による日射遮蔽のために  $T_{s-obs}$  は  $10\text{m}$  程度の間隔で変動し、最低値は  $21.2^\circ\text{C}$  および最高値は  $33.6^\circ\text{C}$  であった。

次に、 $T_{s-cal}$  に着目する。 $L=3\text{m}$  の  $T_{s-cal}$  は区間 III を除いて概ね  $T_{s-obs}$  と一致しており、地形および沿道地物による日陰の影響を再現することができた。区間 III における計算では  $T_s$  が小刻みに変動することは再現できたが、 $T_{s-cal}$  の変動幅 ( $5 \sim 7^\circ\text{C}$ ) は  $T_{s-obs}$  のそれより大きくなった。これは、先述したように樹木による日射の部分的な透過が考慮できなかったことに起因する。 $L=5\text{m}$  および  $10\text{m}$  の  $T_{s-cal}$  は概ね  $R=3\text{m}$  の  $T_{s-cal}$  と同様な路線分布を示したが、区間 III

表 4-1 地形解像度および時刻毎の路面温度予測誤差

地形解像度, $L$ (m)	路面温度予測誤差, $ \overline{\Delta T_s} $ ( $^\circ\text{C}$ )					
	3m	5m	10m	20m	30m	50m
11/4 12:00	2.24	2.18	2.32	3.11	3.24	3.05
11/4 15:00	1.90	1.71	1.83	2.76	2.90	2.69
11/4 18:00	0.67	0.69	0.67	0.86	0.87	0.85
11/4 21:00	0.69	0.67	0.67	0.72	0.73	0.72
11/5 00:00	0.81	0.76	1.00	0.75	0.74	0.76
11/5 06:00	0.44	0.39	0.37	0.38	0.37	0.38
11/5 09:00	1.39	1.31	1.25	1.23	1.23	1.23
全時間合計	1.16	1.10	1.16	1.40	1.44	1.38
日中	1.55	1.47	1.52	1.99	2.06	1.96
夜間	0.65	0.60	0.68	0.62	0.61	0.62

#### 4. 広域路面温度予測モデルの精度改善

に加え区間Ⅱ、区間Ⅴおよび区間Ⅵの一部で路面温度計算誤差 $\Delta T_s$ が増大した。ここで、 $\Delta T_s$ は次式で表される。

$$\Delta T_s = |T_{sc} - T_{so}| \quad (4-2)$$

$L=20\text{m}$ 、 $30\text{m}$  および  $50\text{m}$  の  $T_{sc}$  は区間ⅠおよびⅦで  $T_{s-obs}$  と良好な一致を見たが、区間Ⅱ、Ⅲ、Ⅴ および Ⅵ で局所的に  $\Delta T_s$  の絶対値  $|\Delta T_s|$  が  $2^\circ\text{C}$  を超えた。

夜間(11月5日 0:00)における  $T_s$  の結果の一例として、 $L=5\text{m}$  および  $L=50\text{m}$  に対して示したものが図 4-11 および図 4-12 である。 $T_{s-obs}$  の変動は昼間に比べて小さくなり、 $T_{s-cal}$  は  $T_{s-obs}$  と良好に一致し、計算精度に及ぼす  $R$  の影響は小さくなった。

表 4-1 は  $L$  および時刻毎の  $|\Delta T_s|$  の区間平均誤差  $|\overline{\Delta T_s}|$ 、すなわち全道路要素数の  $|\Delta T_s|$  の平均

値を示す。 $|\overline{\Delta T_s}|$  は日中に比べて夜間に小さくなり易い。また、夜間の  $|\overline{\Delta T_s}|$  は  $L$  に殆ど依存せず  $1^\circ\text{C}$  以下となった。これより、 $|\overline{\Delta T_s}|$  に及ぼす  $q_{sd-cal}$  の誤差の影響は大きいことが理解できる。

図 4-13 は  $L$  毎の  $\Delta T_s$  の相対出現頻度  $F$  をそれぞれ示す。 $|\overline{\Delta T_s}|$  は  $L$  が  $10\text{m}$  から  $20\text{m}$  の間で急増したが、 $L \geq 20\text{m}$  では殆ど変わらなかった。 $F$  は  $L$  に関係なく  $\Delta T_s = 0$  付近で最大となるが、 $L$  が小さい程  $F$  は  $\Delta T_s = 0$  付近に集中し、 $|\overline{\Delta T_s}|$  の増大とともに急減する。

図 4-14 は  $|\overline{\Delta T_s}|$  と  $L$  の関係を示す。 $|\overline{\Delta T_s}|$  は  $L$  が  $10\text{m}$  から  $20\text{m}$  の間で急増している。この原因を検討するために、区間ⅠからⅦに対して  $L$  による  $|\overline{\Delta T_s}|$  の違いを示した結果が表 4-2 で

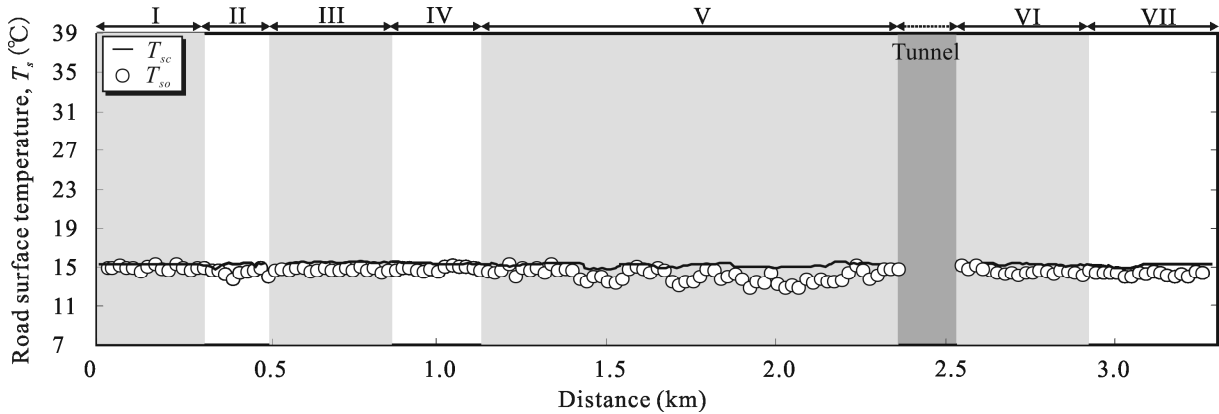


図 4-11 2011 年 11 月 5 日 0 : 00 における路面温度の分布 (地形解像度 5m)

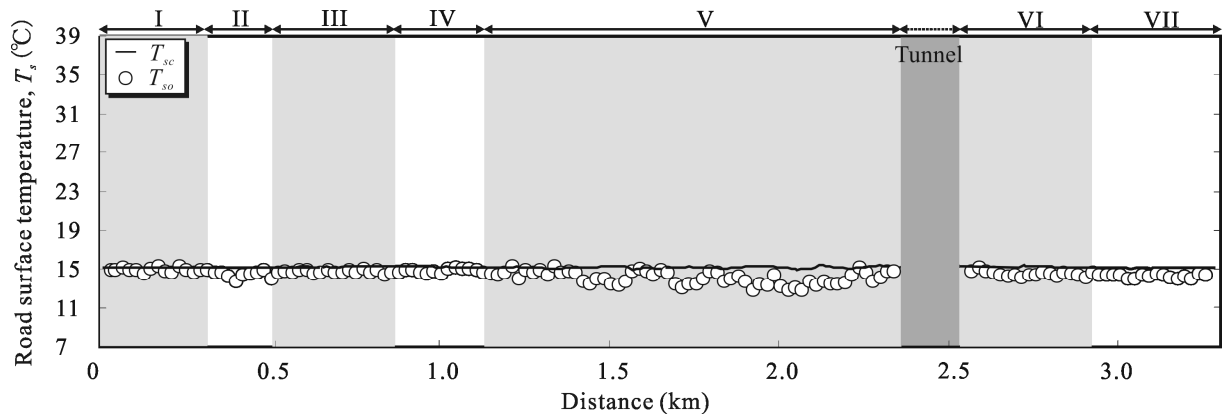


図 4-12 2011 年 11 月 5 日 0 : 00 における路面温度の分布 (地形解像度 50m)

#### 4. 広域路面温度予測モデルの精度改善

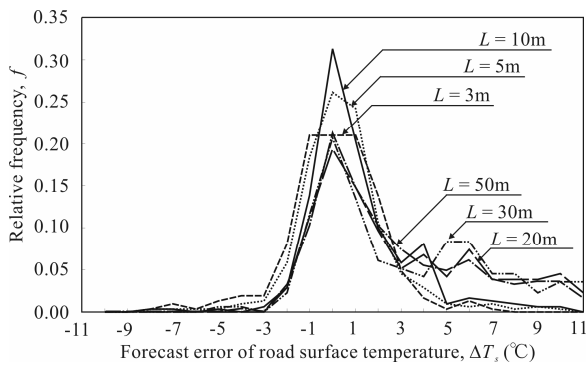


図 4-13 地形解像度毎の路面温度予測誤差の出現  
頻度

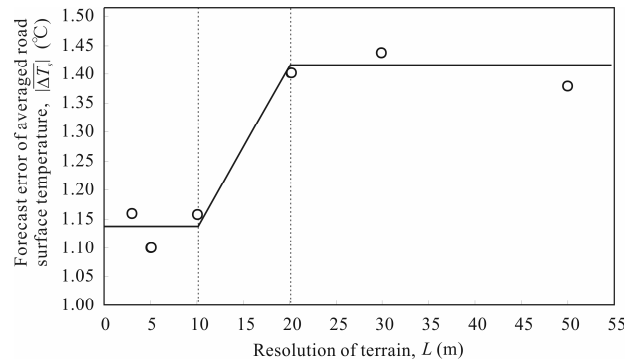


図 4-14 地形解像度と路面温度予測誤差の関  
係

表 4-2 地形解像度および区間毎の路面温度予測誤差

	路面温度予測誤差, $ \Delta T_s $ (°C)					
地形解像度, $L$ (m)	3m	5m	10m	20m	30m	50m
区間 I	0.84	0.86	0.84	0.86	0.86	0.86
区間 II	1.30	1.17	1.21	1.85	1.90	1.83
区間 III	1.69	1.32	1.30	1.26	1.25	1.27
区間 IV	0.94	0.95	0.93	0.71	0.72	0.75
区間 V	1.46	1.59	1.79	2.67	2.81	2.56
区間 VI	0.91	0.88	0.89	1.41	1.47	1.35
区間 VII	1.01	0.94	1.16	1.04	1.08	1.06

ある。平地区間 I, IV および VII の  $|\Delta T_s|$  は  $L$  に依存しないが, 道路に日影を作るような沿道地物等が隣接する区間 II, III, V および VI の  $|\Delta T_s|$  は  $L$  の増加に伴い大きくなる。

以上, 表 4-1 および表 4-2 の結果より, 図 4-14 の  $R$  の増大に伴う  $|\Delta T_s|$  の増大は 4.2.4 a) でも述べたように, 主として道路に隣接する地物形状の空間解像度の低下に起因することが改めて知れる。

#### c) 計算時間

SAFF モデルによる  $T_s$  の計算時間  $t_c$  は, 日向・日陰の計算時間  $t_{cs}$ , 形態係数の計算時間  $t_{cf}$  および道路面要素および地形面要素の表面温度の計算時間  $t_{ct}$  の和として与えられる。

表 4-3 に  $L$  と  $n$ ,  $t_c$ ,  $t_{cs}$ ,  $t_{cf}$  および  $t_{ct}$  の関係を示す。これを両対数で表現したものが図

4-15 である。 $n$  は  $L$  の縮小( $n$  の増大)と共に,  $t_c$  は  $n$  の 2.1 乗に,  $t_{cs}$  および  $t_{cf}$  は  $n$  の 1.8 乗に,  $t_{ct}$  は  $n$  の 0.9 乗にそれぞれ比例して大きくなった。 $t_{cf}$  と  $t_{cs}$  を比べると, 同じ  $L$  でも常に前者が大きい。

以上より,  $t_c$  の短縮には  $t_{cf}$ , 続いて  $t_{cs}$  の計算方法の改善が効果的であると思われる。

#### 4.2.5 おわりに

本研究では, DSM の解像度が SAFF モデルによる路線温度の計算誤差および計算時間に与える影響について, LP データを用いて検討した。計算精度を評価するために, 福井県福井市合谷町においてサーマルマッピングを行い, 日射フラックスおよび路面温度の路線分布を求め, それぞれ計算結果と比較した。

#### 4. 広域路面温度予測モデルの精度改善

表 4-3 地形解像度と要素数および計算時間の関係

地形 解像度 $R$ (m)	地形面 要素数 $n$	計算時間 (min)			
		全計算 時間 $t_c$	影計算 時間 $t_{cs}$	形態係数 計算時間 $t_{cf}$	路面および 地表温度 計算時間 $t_{ct}$
3	51715	1556.4	208.1	1033.1	315.5
5	23619	477.5	36.6	235.5	205.4
10	13125	186.6	12.3	66.4	108.0
20	6673	75.3	2.8	13.1	59.5
30	4593	50.8	1.2	6.1	43.5
50	2919	33.8	0.4	2.2	31.2

以下に得られた知見を列挙する.

1. 地形解像度 $L \leq 10\text{m}$ のDSMを用いた場合、日射量の計算値 $q_{sd-cal}$ は実測値 $q_{sd-obs}$ と良好に一致した.
2. 路線温度の計算誤差 $\Delta T_s$ は夜間より昼間で大きく、 $L$ が10mから20mの間で急増した.
3. (2)の結果は $L$ の増大に伴う沿道地物の再現が困難になること(形状誤差)に起因する.
4. 今回の対象路線では $L \leq 10\text{m}$ とすることが好ましいが、平地では $L = 50\text{m}$ でも正確な路面温度予測が可能である.
5. 計算時間 $t_c$ は要素数 $n$ のべき乗に比例して長くなる.  $t_c$ を減らすためには形態係数、続いて日向・日陰の計算の改善が効果的である.

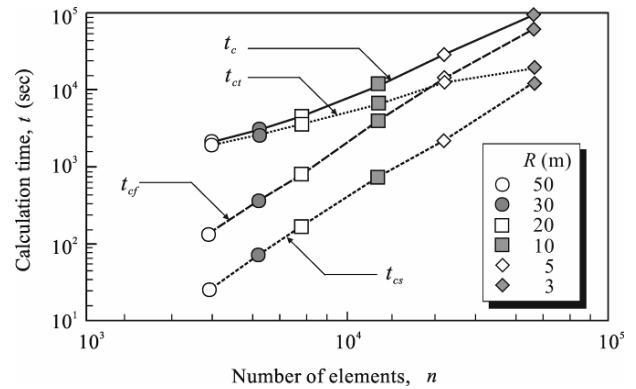


図 4-15 要素数および計算時間の関係

### 4.3 道路気象センサ実測値を用いた補正路面温度予測モデル

#### 4.3.1 はじめに

積雪寒冷地域では、冬の低温や降雪による道路交通機能低下を防ぐために、除雪や凍結防止剤散布は必要不可欠である。路面温度予測モデル(RSTFモデル)は効率的な冬期道路管理の支援(除雪や凍結防止剤散布の時間および箇所の決定)を目的として、様々な機関で研究開発が行われている<sup>1)~4)</sup>。さらに、積雪寒冷地域を通る道路の中には、路面温度、降水量および積雪深などの道路気象データを計測するシステムが整備されている区間がある。例えば、兵庫県春日和田山道路(約35km)では、道路気象センサが8基設置され、20分毎に道路気象データの取得、処理および配信を行っている。こうした道路気象実測値は道路の現状を把握するには有効であるが、得られた情報から将来の路面状態を推測することは難しい。

そこで本研究では、任意時刻の路面温度実測値を用いて、それ以降の予測路面温度を補正す

ることでRSTFモデルの精度を改善する、補正路面温度予測モデル(R-RSTFモデル)を構築したので、ここに報告する。

#### 4.3.2 R-RSTF モデルの概要

図 4-16にR-RSTFモデルの概要を示す。R-RSTFモデルでは、豊岡河川国道事務所から路面温度実測値を、気象庁から路面温度予測地点周辺の気象数値予報データをそれぞれ取得する。路面温度実測値を使用する時点が計算の初期時刻となるので、初期条件として舗装および地盤温度の鉛直分布を式(4-3)より求める。

$$T_c = T_i + \frac{d_c - z}{d_c} (T_{s-obs} - T_{si}) \quad (4-3)$$

ここに、 $T_c$ ：舗装表面からの深さ  $z$ (m)における補正後の舗装温度(°C)、 $T_i$ ： $z$ における補正前の舗装温度(°C)、 $d_c$ ：舗装温度の日変化がなくなる舗装深さ(m)、 $T_{s-obs}$ ：路面温度実測値(°C)および  $T_{si}$ ：補正前の予測路面温度(°C)である。本計算では  $d_c=0.3\text{m}$  とした。

路面における熱収支は式(4-4)で表される。

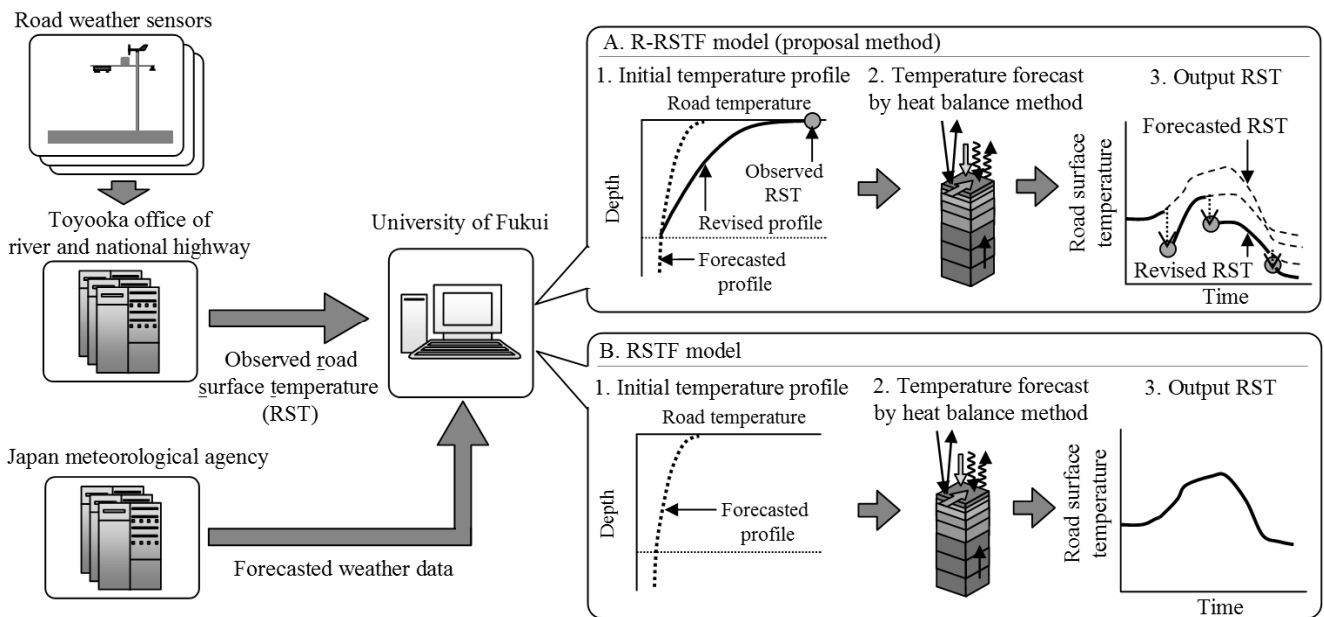


図 4-16 R-RSTF モデルおよび RSTF モデルの概要

#### 4. 広域路面温度予測モデルの精度改善

$$(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} z_s = q_{cs} + q_{sds} + q_{lds} - q_{lus} + q_{as} \quad (4-4)$$

ここに,

- $(\rho c)_s$  : 道路表層の体積熱容量 (J/m<sup>3</sup>K)  
 $T_s$  : 道路表層温度 (°C)  
 $z_s$  : 道路表層厚 (m)  
 $q_{cs}$  : 路面熱伝導フラックス (W/m<sup>2</sup>)  
 $q_{sds}$  : 路面に入射する日射フラックス (W/m<sup>2</sup>)  
 $q_{lds}$  : 路面に入射する長波放射フラックス (W/m<sup>2</sup>)  
 $q_{lus}$  : 路面からの長波放射フラックス (W/m<sup>2</sup>)  
 $q_{as}$  : 車両誘発風および自然風による顕熱フラックス (W/m<sup>2</sup>)  
 $t$  : 時間 (sec)

である.

道路表層以深の熱収支は, 式(4-5)の熱伝導方程式で与えられる.

$$(\rho c)_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = -\frac{\partial q_c}{\partial z} \quad (4-5)$$

ここに,

- $(\rho c)_p$  : 舗装の体積熱容量 (J/m<sup>3</sup>K)  
 $T_p$  : 舗装温度 (°C)  
 $q_c$  : *Fourier*の式に従う舗装の熱伝導フラックス (W/m<sup>2</sup>)

である. 本計算では鉛直方向の熱移動のみを考慮した.

今回, 式(4-3)による路面近くの舗装温度補正は, 6時間毎に行われた.

##### 4.3.3 R-RSTF モデルの精度検証方法

兵庫県春日和田山道路の和田トンネル春日側坑口付近において野外観測を行い,  $T_{s-obs}$ , 気温  $T_a$ , 日射フラックス  $S$  および長波放射フラックス  $L$  を計測した. 同時に, R-RSTF モデルおよび RSTF モデルで求めた  $T_s$  の予測値  $T_{fr}$  および  $T_f$  と  $T_{s-obs}$  を用いて, 両モデルの路面温度予測誤差  $\Delta T_s$  を比較した.  $\Delta T_s$  は, 予測実行時刻から 24 時間経過時の  $T_{fr}$  および  $T_f$  と  $T_{s-obs}$  の

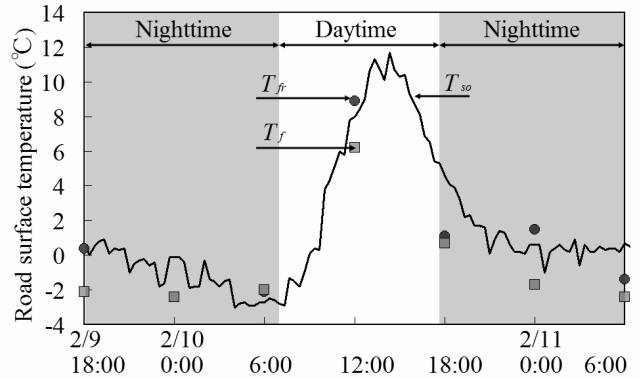


図 4-17  $T_{s-obs}$ ,  $T_{fr}$  および  $T_f$  の経時変化  
(和田トンネル春日側坑口)

表 4-4 R-RSTF モデルおよび  
RSTF モデルの路面温度予測誤差

時刻	路面温度予測誤差 $\Delta T_s$ (°C)	
	R-RSTF モデル	RSTF モデル
2/9 18:00	0.4	2.1
2/10 0:00	1.8	1.8
2/10 6:00	0.6	0.5
2/10 12:00	1.4	2.1
2/10 18:00	4.7	5.1
2/11 0:00	0.9	2.3
2/11 6:00	2.1	2.8
全時間平均	1.7	2.4

差の絶対値とした. 検証は 2012/2/9 18:00 から 36 時間に亘り行われた.

##### 4.3.4 観測および計算結果

図 4-17 に和田トンネル春日側坑口における  $T_{s-obs}$  (図中実線),  $T_{fr}$  (図中●) および  $T_f$  (図中■) の経時変化をそれぞれ示す. なお図中灰色で示す時間帯は夜間を示す.  $T_{s-obs}$  は 2/10 7:00 に -2.9°C で最低となった. その後  $S$  の増加および  $T_a$  の上昇に伴い  $T_{s-obs}$  は上昇し, 同日 14:00 に最高 11.7°C となった.  $T_{fr}$  および  $T_f$  は  $T_{s-obs}$  と



同様の傾向を示したが、 $T_f$ は $T_{fr}$ と比較してほぼ全ての時間帯で低くなった。また、2/10 18:00での $T_{fr}$ および $T_f$ と $T_{s-obs}$ の大きな不一致は、主に気象予測の誤差に起因する。

表 4-4 に R-RSTF モデルおよび RSTF モデルの $\Delta T_s$ を示す。R-RSTF モデルの $\Delta T_s$ は RSTF モデルのそれと比較して全体的に小さく、全時刻の平均 $\Delta T_s$ は RSTF モデルの 2.4℃から 1.7℃となった。また、R-RSTF モデルによる路面温度予測の改善はほぼ全ての時刻で認められた。

#### 4.3.5 おわりに

本研究で提案した R-RSTF モデルを用いることで、より高い精度で路面温度を予測することができた。今後は路面温度の予測範囲を点から面に拡張し、より実際の冬期道路管理に活用し易いモデルの開発を目指す。

#### 4.4 気温長期観測データを用いた気温予報値の補正

##### 4.4.1 はじめに

SAFF モデルの予測精度は気温，日射および長波放射フラックスなどの予報精度に大きく影響される．第3章で述べたように，気象予報値と実際の値が異なる場合は路面温度の予測精度も低下するため，気象予報精度の改善は路面温度予測精度を改善することにつながる．

気象を物理的手法で予測する数値予報は現在主要な予測手法となっており，多くの広域 RSTF モデルは数値予報結果を気象条件として用いている．しかしながら，数値予報は特定の条件下において予測誤差が大きくなることが示されている<sup>8)</sup>．このため，数値予報の誤差が大きくなる条件を特定し，予報結果を補正することが可能になれば路面温度予測精度も改善することが可能である．

一方で，気象の計測およびデータの蓄積は多くの箇所で行われている．特に，様々な用途で必要とされる気温については気象庁アメダスや4.3で挙げた道路気象センサなどによって多くの地点で計測が行われており，長期間に亘る計測結果を比較的容易に入手することができる．

そこで，本節では気温実測データを用いて気温予報誤差の傾向を統計的に処理し，得られた結果を基に気温予報値の補正を行う方法(気温補正法)を構築する．

##### 4.4.2 気温計測地点における気温予報値の補正方法

任意の地点における気温の実測値  $T_{a-obs}$  と予報値  $T_{a-cal}$  は様々な要因により誤差が生じる．

図 4-18 は 2011 年 1 月の福井気象台における気温実測値と予報値の分布を示したものであり， $T_{a-obs} < 0^{\circ}\text{C}$  では  $T_{a-obs}$  は  $T_{a-cal}$  よりも大きくなる傾向があることが分かる．また，図 4-19 は  $T_{a-cal}$  と  $T_a$  の予測誤差  $e_a (= T_{a-cal} - T_{a-obs})$  の関係

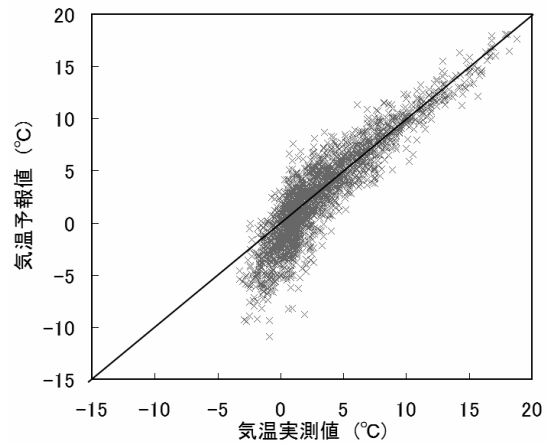


図 4-18 気温予報値と実測値の関係 (2011 年 1 月 福井気象台)

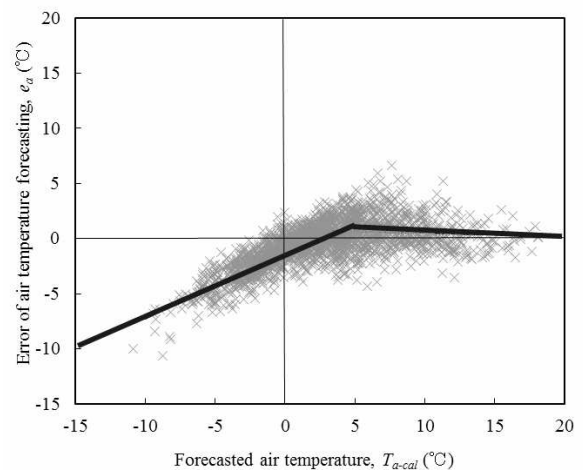


図 4-19 気温予報値と気温予測誤差の関係 (2011 年 1 月 福井気象台)

を示したものである．同図からは  $T_{a-cal} > 5^{\circ}\text{C}$  では  $e_a$  は  $0^{\circ}\text{C}$  前後であるが， $T_{a-cal} \leq 5^{\circ}\text{C}$  では  $T_{a-cal}$  が低くなるに従い  $e_a$  は小さくなることが分かる．このような  $T_{a-cal}$  と  $e_a$  の関係は地点毎に異なる相関を示すと考えられる．各計測地点でこれらの関係を求めることで，気温計測地点における予報誤差を補正した気温  $T_{a-cal}'$  を以下の式で求めることが可能となる．

$$T_{a-cal}' = T_{a-cal} - e_a \quad (4-6)$$

#### 4. 広域路面温度予測モデルの精度改善

##### 4.4.3 気温予測値と予測誤差の関係の評価

福井県嶺北とその周辺のアメダス観測値と同地点における気象庁メソ数値予報モデル格子点値の気温予報結果を比較することで、 $T_{a-cal}$ と $e_a$ の関係を定量的に評価した。以下に詳細を示す。

##### a) 気温実測値および予報値の取得

表 4-5 に評価に用いた  $T_{a-obs}$  の計測位置を示す。 $T_{a-obs}$  は福井県および岐阜県西部におけるアメダス気温実測値を用いた。 $T_{a-cal}$  は気象庁メソ数値予報モデル格子点値のうち、気温測定を行っている箇所に最も近い地点における予報値を用いた。本検証では 2011 年 1 月における  $T_{a-cal}$  と  $e_a$  の関係を求めた。

表 4-5 気温測定点の位置

気温計測箇所	北緯	東経
越廼	36° 00.7'	135° 59.4'
今庄	35° 46.0'	136° 12.0'
三国	36° 14.6'	136° 10.4'
勝山	36° 02.3'	136° 31.3'
大野	35° 58.3'	136° 29.8'
敦賀	35° 39.2'	136° 03.7'
樽見	35° 38.3'	136° 36.2'
長滝	35° 55.4'	136° 49.9'
白川	36° 16.4'	136° 53.8'
栢野	36° 13.5'	136° 21.5'

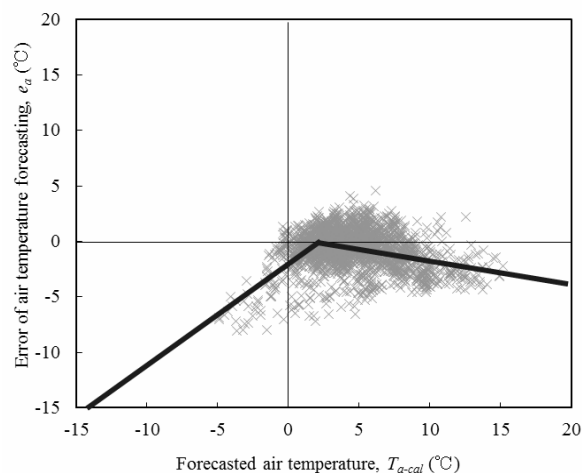


図 4-20 気温予報値と気温予報誤差の関係  
(福井県越廼)

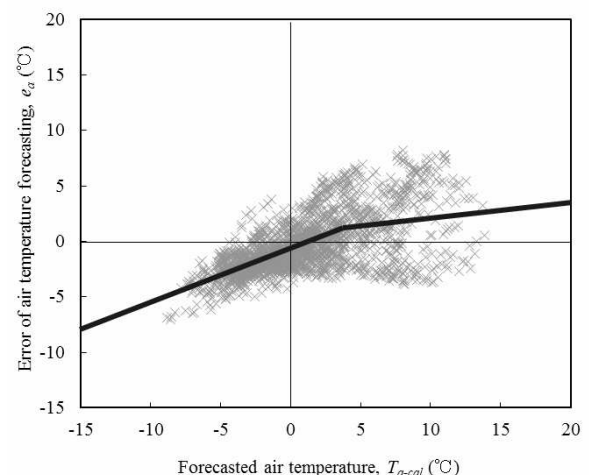


図 4-21 気温予報値と気温予報誤差の関係  
(福井県今庄)

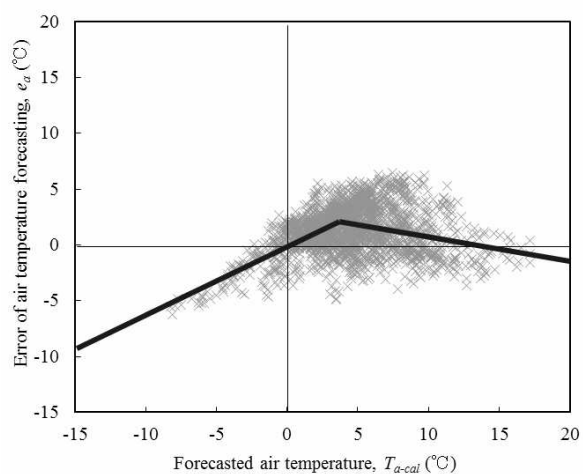


図 4-22 気温予報値と気温予報誤差の関係  
(福井県三国)

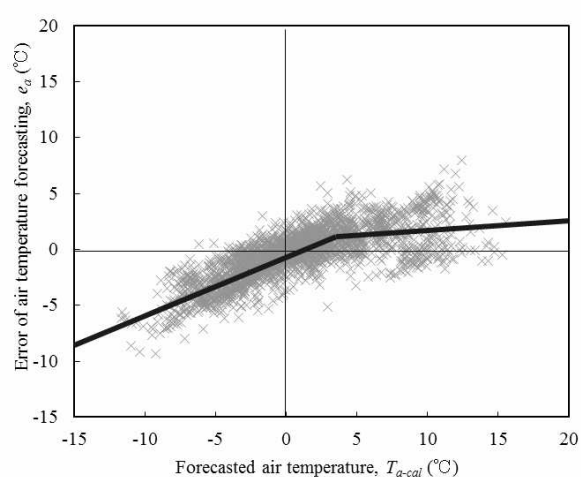


図 4-24 気温予報値と気温予報誤差の関係  
(福井県勝山)

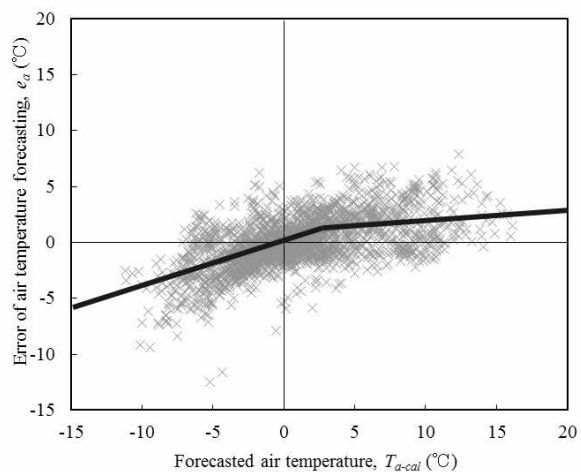


図 4-25 気温予報値と気温予報誤差の関係  
(福井県大野)

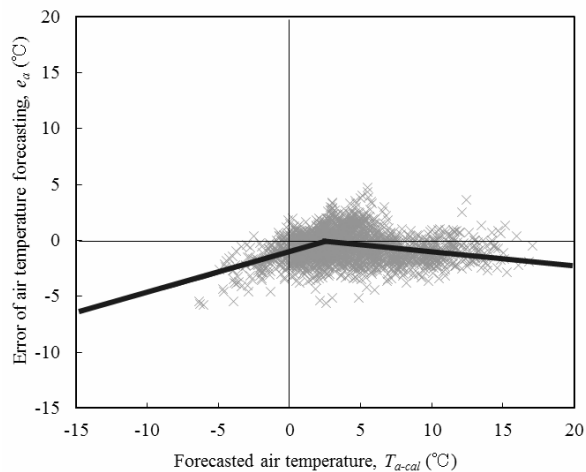


図 4-26 気温予報値と気温予報誤差の関係  
(福井県敦賀)

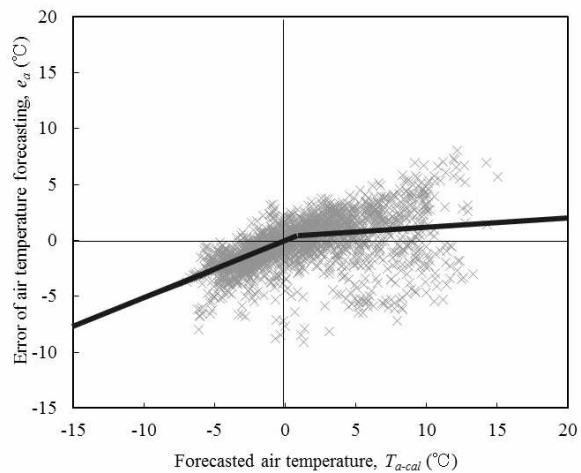


図 4-23 気温予報値と気温予報誤差の関係  
(岐阜県樽見)

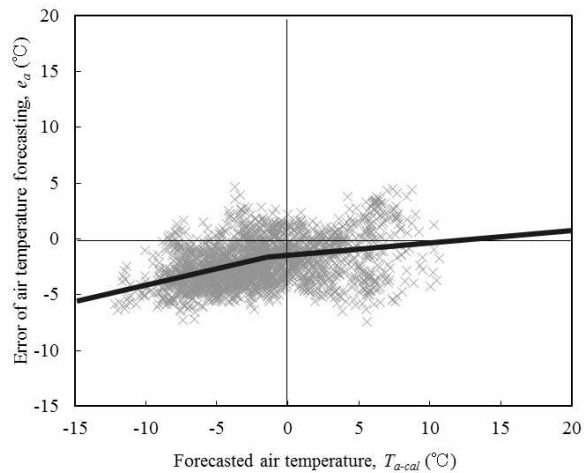


図 4-27 気温予報値と気温予報誤差の関係  
(岐阜県長滝)

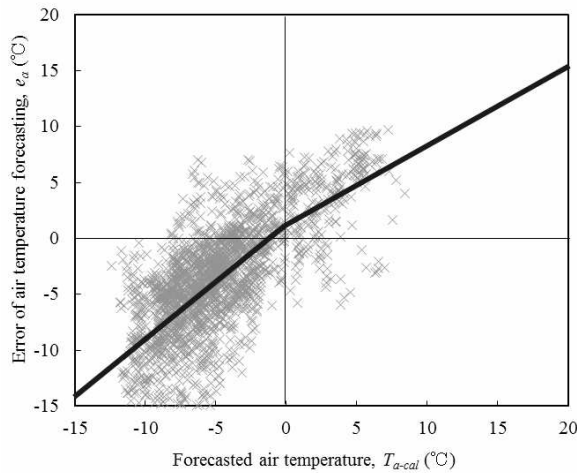


図 4-28 気温予報値と気温予報誤差の関係  
(岐阜県白川)

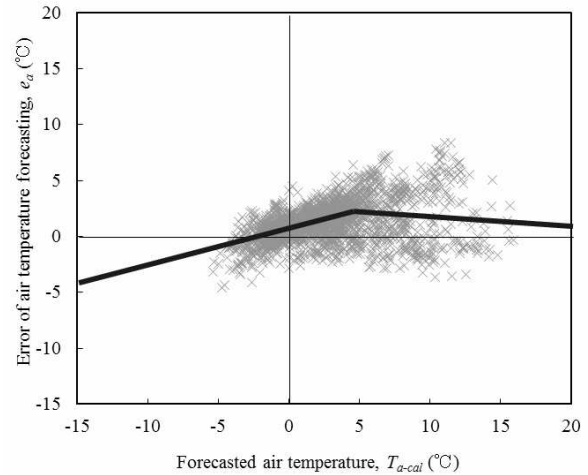


図 4-29 気温予報値と気温予報誤差の関係  
(石川県栢野)

#### b) 気温予報誤差の表現方法

図 4-20 から図 4-29 は各地点における  $T_{a-cal}$  と  $e_a$  の関係を示す。  $e_a$  は大部分の地点で  $T_{a-cal} < 0^\circ\text{C}$  の時に負の値となる傾向にあり、  $T_{a-cal}$  が低下するに従い  $e_a$  は小さくなった。このときの  $e_a$  の低下率は地点毎に異なり、岐阜県白川では低下率が大きく、福井県大野や石川県栢野などでは低下率が小さくなった。一方、  $T_{a-cal} > 5^\circ\text{C}$  では  $T_{a-cal}$  に比例して  $e_a$  が大きくなる地点、  $T_{a-cal}$  に大きくなるに従い  $e_a$  が小さくなる地点および  $T_{a-cal}$  に係わらず  $e_a$  がほぼ一定の値をとる地点があり、地点毎の  $e_a$  と  $T_{a-cal}$  の関係はそれぞれ異なる傾向を示した。

これらの結果から、  $e_a$  と  $T_{a-cal}$  の関係は地点を問わず、以下の式で表される。

$$e_a = \eta_1(T_{a-cal} - \beta) + \gamma \quad (T_{a-cal} > \beta) \quad (4-7)$$

$$e_a = \eta_2(T_{a-cal} - \beta) + \gamma \quad (T_{a-cal} \leq \beta) \quad (4-8)$$

式 4-7 および式 4-8 の誤差の傾向を表す係数(誤差傾向係数)  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\beta$  および  $\gamma$  は最小二乗法を用いて求めた。表 4-6 に気温測定点毎の  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\beta$  および  $\gamma$  を示す。

以上の結果より、気温測定地点における  $T_{a-cal}$  と  $e_a$  の関係を定量的に評価することが可能となった。

表 4-6 気温測定点毎の誤差傾向係数

気温計測箇所	$\eta_1$	$\eta_2$	$\beta$	$\gamma$
越廼	-0.234	0.897	2.388	0.114
今庄	0.129	0.495	4.040	1.334
三国	-0.233	0.603	3.949	2.280
勝山	0.075	0.547	2.793	1.185
大野	0.083	0.379	4.170	1.428
敦賀	0.083	0.493	1.739	0.487
樽見	0.082	0.492	1.738	0.487
長滝	0.124	0.253	-2.010	-1.951
白川	0.694	1.073	-0.530	0.993
栢野	-0.084	0.330	4.990	2.269

#### 4.4.4 任意の地点における気温予測値の補正方法

4.4.3.4.4 で求めた  $T_{a-cal}$  と  $e_a$  の関係は各気温計測地点におけるものであり、SAFF モデルの予測精度改善に用いるためには  $T_{a-cal}$  と  $e_a$  の関係を面的に求める必要がある。そのため本論文では、各気温計測地点の  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\beta$  および  $\gamma$  を逆距離荷重法を用いて 2 次元補間した。

任意の地点における  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\beta$  および  $\gamma$  は以下



表 4-7 気温補正モデル適用時および非適用時の路面温度予測精度

地点	路面温度予測誤差, $\Delta T_s$ (°C)		
	気温補正モデル 非適用	気温補正モデル適用 (気温実測地点数:10)	気温補正モデル適用 (気温実測地点数:26)
坂井市山竹田	1.34	0.98	0.96
坂井市御油田	1.66	1.26	1.35
大野市牛ヶ原	1.12	1.05	1.01
勝山市坂東島	2.10	1.73	1.67
福井市川上	1.59	1.29	1.27
大野市南新在家	1.68	1.38	1.34
越前市家久	1.77	1.20	1.67
越前市広瀬	1.85	1.48	1.68
南越前町大門	1.28	1.12	1.16
鯖江市上戸口町	1.40	1.50	1.03
越前市上山中	1.90	2.62	2.74
鯖江市石生谷	1.58	1.35	1.42
鯖江市川去町	1.85	1.40	1.83
越前町野田	1.74	1.72	1.59
福井市白滝	2.04	2.74	1.60
福井市竹生	1.68	1.49	1.57
福井市縫原	1.66	1.18	1.08
坂井市東長田	1.82	1.40	1.43
坂井市猪爪	1.66	1.44	1.46
坂井市上久米田	1.60	1.19	1.19
全地点平均	1.67	1.48	1.45

測データを用いて気温補正法によって路面温度予測を行った場合の $\Delta T_s$ は $1.45^{\circ}\text{C}$ であり、気温補正法を用いることで $\Delta T_s$ は $0.2^{\circ}\text{C}$ 程度小さくなった。また、気温補正法に用いた気温実測地点数が10か所の場合の $\Delta T_s$ の平均値と26か所の場合のそれに大きな差は見られなかった。地点毎の計算手法による $\Delta T_s$ の差に着目すると、坂井市山竹田、上久米田や勝山市坂東島などでは気温補正法を用いた場合の $\Delta T_s$ の減少幅が $0.4^{\circ}\text{C}$ 程度と他の地点より大きくなった。これは、上記の地点では $T_{a-obs}$ が氷点下になる時間が他の地点よりも長いために、気象庁メソ数値予報モデルによる $T_{s-cal}$ が $T_{a-obs}$ より低く予測される現象が補正される機会が多かったためである。

#### 4.4.6 おわりに

本節では気象庁アメダスや道路気象センサによる長期気温観測データおよび数値予報結果を基に、気温数値予報値を補正する気温補正法を構築した。また、気温補正法をSAFFモデルに組み込み、路面温度予測精度の改善効果を検証した。以下に得られた結果を列挙する。

- (1) 気象庁メソ数値予報モデル格子点値による気温予測値は、実際の気温が氷点下となる場合に過小に予測する傾向がある。
- (2) 気温予測値と実測値の関係を長期に亘り比較し、気温計測地点での予測誤差の傾向を空間的に補間することで、任意の地点における気温予報結果の誤差の傾向を定量的に評価することが可能となった。
- (3) 気温補正法をSAFFモデルに組み込んだ

場合、路面温度予測精度は平均で  $0.2^{\circ}\text{C}$  向上する。

- (4) 路面温度予測精度は、気温実測地点間の距離が  $20\text{km}$  程度でも路面温度予測精度の改善効果が見られた。一方、気温実測地点間の距離をさらに小さくした場合の路面温度予測精度改善効果は小さくなった。
- (5) (4)の結果より、本節で構築した気温補正法は気象庁アメダスによる気温計測結果を用いることで、日本国内におけるほぼすべての地域で路面温度予測制度の改善を可能とする。



## 参考文献

- 1) 須田公男, 水嶋正二, 赤川正臣: 一般国道 8 号, 17 号の路面凍結予測について, 日本雪氷学会誌, Vol. 50, No. 3, pp. 155-163, 1988.
- 2) 高橋尚人, 徳永ロベルト, 浅野基樹, 石川信敬, 林華奈子: 我が国の冬期道路管理に適した MDSS (Maintenance Decision Support System) の構築と運用, 寒地技術論文・報告集, Vol. 23, pp. 307-312, 2007.
- 3) 西村浩一, 平島寛行, 小杉健二, 小林俊市, 佐藤威, 佐藤篤司: 道路雪氷の広域予測に関する研究 I, 寒地技術論文・報告集, Vol. 20, pp. 122-127, 2004.
- 4) Chapman, L. and Thones, J. E. :A blueprint for 21<sup>st</sup> century road ice prediction, 11<sup>th</sup> International Road Winter Conference, 2002.
- 5) 齊田光, 藤本明宏, 福原輝幸: 熱収支法による広域路面温度予測モデル — 乾燥路面の路線温度分布予測 —, 土木学会論文集, 登載決定
- 6) 梅干野晃, 浅輪貴史, 中大窪千晶: 3D-CAD と屋外熱環境シミュレーションを一体化した環境設計ツール, 日本建築学会技術報告集, Vol. 20, pp. 195-198, 2004.
- 7) 山村信司, 梅干野晃, 浅輪貴史: 建築外部空間デザインの設計支援を目的とした熱放射環境の予測手法の開発, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 554, pp. 85-92, 2002.
- 8) 古川武彦: 気象予報と信頼性の評価, 日本信頼性学会誌, Vol.26, No. 2, pp.120-129, 2004.

## 本章で用いた記号

$(\rho c)_p$	: 舗装の体積熱容量	(J/m <sup>3</sup> K)
$(\rho c)_s$	: 道路表層の体積熱容量	(J/m <sup>3</sup> K)
$d(x, x_i)$	: 任意の地点と $i$ 番目の気温計測地点間の距離	(m)
$e_a$	: 気温の予測誤差	(°C)
$F$	: $R$ 毎の $\Delta T_s$ の相対出現頻度	(-)
$L$	: 地形解像度	(m)
$n$	: 気温計測地点数	(-)
$p$	: 補正係数	(-)
$p_{dir}$	: 直達日射フラックスが全天日射フラックスに占める割合	(-)
$q_{as}$	: 車両誘発風および自然風による顕熱フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_c$	: <i>Fourier</i> の式に従う舗装の熱伝導フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{cs}$	: 路面熱伝導フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{ld}$	: 長波放射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{ld-cal}$	: 長波放射フラックスの計算値	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{ld-obs}$	: 長波放射フラックスの実測値	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{lds}$	: 路面に入射する長波放射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{lus}$	: 路面からの長波放射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sd}$	: 日射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sd-cal}$	: 日射フラックスの計算値	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sd-obs}$	: 日射フラックスの実測値	(W/m <sup>2</sup> )
$q_{sds}$	: 路面に入射する日射フラックス	(W/m <sup>2</sup> )
$RH_a$	: 大気相対湿度	(-)
$t$	: 時間	(sec)
$T_a$	: 気温	(°C)
$t_c$	: 24 時間の路面温度計算に要した時間	(min.)
$t_{cf}$	: 形態係数の計算時間	(min.)
$t_{cs}$	: 日向・日陰の計算時間	(min.)
$t_{ct}$	: 道路面要素および地形面要素の表面温度の計算時間	(min.)
$T_s$	: 路面温度	(°C)
$T_{s-cal}$	: 気温の計算値	(°C)
$T_{s-cal}$	: 路面温度の計算値	(°C)
$T_{s-obs}$	: 気温の実測値	(°C)
$T_{s-obs}$	: 路面温度の実測値	(°C)
$u(x)$	: 任意の地点における誤差傾向係数	(-)
$u(x_i)$	: $i$ 番目の気温計測地点における誤差傾向係数の補間係数	(-)
$V_w$	: 自然風の風速	(m/sec)
$w_i(x)$	: $i$ 番目の気温計測地点における補間係数	(-)
$z_s$	: 道路表層厚	(m)

#### 4. 広域路面温度予測モデルの精度改善

---

$\Delta T_s$	: 任意地点での路面温度誤差	(°C)
$\beta$	: 気温予報値の誤差の傾向を表す係数	(-)
$\gamma$	: 気温予報値の誤差の傾向を表す係数	(-)
$\eta_1$	: 気温予報値の誤差の傾向を表す係数	(-)
$\eta_2$	: 気温予報値の誤差の傾向を表す係数	(-)

## 5. 結論

### 5.1 本研究のまとめ

本研究は、効率的な冬期道路管理を行うために、熱収支による広域路面温度予測システムの開発を試みた。そのために、デジタル標高モデル(DSM)を用いた広域気象モデルの構築に加えて、路面温度を面的に予測する熱収支モデル(SAFFモデル)を構築し、精度検証を行った。また、SAFFモデルの精度を改善するためにDSM解像度の改善、気温予報値の補正手法および道路気象センサによる実測値の利用手法を開発した。さらに、兵庫県北近畿自動車道および福井市南部においてサーマルマッピングを実施し、SAFFモデルの妥当性および精度検証を行った。

以下に本研究で得られた知見を列挙する。

**第1章 序論**では、現在の冬期道路管理の現状と課題を挙げ、冬期道路管理の効率化を実現するための手法として路面温度予測結果に基づく除雪および凍結防止剤散布時期の適正化が有効であることを述べた。既存の路面温度予測モデルの問題点を解決するために、第2章ではデジタル標高データを用いた広域気象算定法、および第3章では広域路面温度予測モデルで述べるSAFFモデルを提案し、第4章では広域路面温度予測モデルの精度改善方法を述べた。

**第2章 デジタル標高データを用いた広域気象算定法**では、DSMおよび数値予報値を用いて路面温度に大きな影響を及ぼす日射および長波放射フラックスを予測するための広域気象予測法を構築した。また、兵庫県北近畿豊岡自動車道において日射および長波放射フラックスの線的計測を行い、計算値と実測値を比較した。以下に得られた知見を列挙する。

- (5) 広域気象予測法を用いることで、沿道地物および気象条件が日射フラックスに与える影響を概ね正しく取り込むことが可能となった。
- (6) 日射フラックスの予測誤差は主に道路面要素へ入射する日射の日射遮蔽判定の誤りに起因する。
- (7) (2)の主な原因は、DSMで表現できないような小さな沿道地物による。
- (8) 長波放射フラックスは路線に亘り概ね正確に計算することができた。

**第3章 広域路面温度予測モデル**では、DSMを用いた新しい広域路面温度予測モデル(SAFFモデル)を提案するとともに、実際の道路管理を念頭に計算の高速化と精度について検討した。そのために、兵庫県北近畿豊岡自動車道において野外観測(サーマルマッピング)を行った。路面温度のみならず、今まで評価されてこなかった日射フラックスおよび長波放射フラックスの路線分布についても、実測値と計算値からSAFFモデルを詳細に評価した。

以下に得られた知見を列挙する。

- (9) SAFFモデルによる路面温度誤差の観測期間に亘る空間(路線)平均誤差は1.5℃であり、定点を対象とした従来の路面温度予測と同程度の精度となった。路面温度誤差<1℃の空間的中率は58%、路面温度誤差<2℃のそれは86%であった。
- (10) 日射フラックスの計算値は路線の大部分で実測値と概ね一致し、山岳による日射遮蔽を正しく計算することができた。
- (11) 50mメッシュのDSMでは沿道地物による局所的な日陰を表現することは困難であり、日向および日陰の判別ミスで路面温度計算値は2℃以上の誤差が生じた。他方、沿道地物がなければ50mメッシュのDSMは十分利用できる。

- (12) 地形面要素数の削減および不可視地形面要素の計算除外による計算高速化手法を用いることで、計算精度を低下させることなく計算時間を1/23に短縮できた。
- (13) (8)により、当該路線では現状から1時間後の路線温度予測(計算が1時間以内に完了すること)が可能になった。
- (14) SAFFモデルの気象入力条件に数値予報データを用いた場合、路面温度の路線に亘る平均誤差は1.8℃であり、概ね良好に路線温度の予測が可能である。

、第4章 広域路面温度予測モデルの精度改善では、1)航空レーザ測量データ(LP データ)を用いた広域路面温度予測の高精度化、2)道路気象センサを用いた路面温度予測補正、3)気温長期観測データを用いた気温予報値の補正により、路面温度計算精度の改善を試みた。以下に得られた知見を列挙する。

- (11) 地形解像度 $\leq 10\text{m}$ のDSMを用いた場合、日射量の計算値は実測値と良好に一致した。
- (12) 路線温度の計算誤差は夜間より昼間で大きく、地形解像度が10mから20mの間で急増した。
- (13) (12)の結果は地形解像度の増大に伴う沿道地物の形状誤差に起因する。
- (14) 今回の対象路線では地形解像度 $\leq 10\text{m}$ とすることが好ましいが、平地では地形解像度が50mでも正確な路面温度予測が可能である。
- (15) 計算時間は要素数のべき乗に比例して長くなる。計算時間を減らすためには形態係数、続いて日向・日陰の計算の改善が効果的である。
- (16) 気象庁メソ数値予報モデル格子点値による気温予報値は、実際の気温が氷点下となる場合に過小に予測する傾向がある。
- (17) 気温計測地点での予測誤差の傾向を空間的に補間することで、任意の地点における気温予報結果の誤差の傾向を定量的に評

価することが可能となった。

- (18) 気温補正法を SAFF モデルに組み込んだ場合、路線温度予測精度は平均で0.2℃向上する。
- (19) 路面温度予測精度は、気温実測地点間の距離が20km程度の場合路面温度予測精度の改善効果が見られた。一方、気温実測地点間の距離をさらに小さくした場合の路面温度予測精度は前者とほぼ同程度であった。
- (20) (19)の結果より、気温補正法は気象庁アメダスによる気温計測結果を用いることで、日本国内のほぼ全域での適用が期待できる。

## 5.2 今後の課題と展望

本研究により、物理的手法を用いて路面温度を路線に亘り予測することが可能となった。しかしながら、実際の冬期道路では降雨、降雪や放射冷却などに伴う路面凍結などの現象が生じる。本研究により開発された SAFF モデルでは水分の移動および相変化を考慮していないため、これらの要因を考慮することで路面の雪氷状態を面的に予測することが可能となる。さらに、凍結防止剤散布や除雪による影響を SAFF モデルに組み込むことが出来れば、より実際の冬期道路管理に適用し易くなる。

異常、SAFF モデルを広域路面雪氷状態予測モデルへ改良することは今後の大きな課題の1つとなる。

また、第3章および第4章で述べたように、SAFFモデルでは路面温度の空間変化をより緻密に再現するために計算要素数が増えると、計算時間は指数関数的に増大することが明らかとなった。これは迅速な路面温度および路面雪氷状態予測を必要とする冬期道路管理とは相容れない事項であり、さらなる計算の高速化が必要である。計算高速化の方法としては、日射遮蔽や形態係数の計算および路面温度予測計算の並列化や、複数のコンピュータを連携して

計算を行う分散コンピューティング, 画像処理ユニット(GPU)を用いた計算などがあり, これらの手法を SAFF モデルに取り入れることが考えられる.

また, 本研究で開発した広域気象モデルは沿道地物による遮蔽や反射, 輻射を考慮した上で日射および長波放射フラックスを面的に予測することが可能である. このため, 土壌中の塩移動予測や建築および都市熱環境シミュレーション, 太陽光発電量の予測, 太陽熱淡水化装置の設置に適した箇所の予測など多岐にわたる応用が期待できる. 今後は, SAFF モデルの冬期道路管理以外への適用可能性についても検討を行う.

## 6. 補遺

### 6.1 はじめに

第2章から第4章で開発した SAFF モデルにより、任意の路線における日射および長波放射フラックスや路面温度を精度よく予測することが可能となった。ここでは、2010 年から 2012 年に亘り兵庫県豊岡河川国道事務所および福井県福井河川国道事務所と共同で行った、SAFF モデルを利用した冬期道路管理の適正化に関する検討結果の例を示す。

### 6.2 中部縦貫自動車道永平寺大野道路における広域路面温度予測モデルの適用

中部縦貫自動車道永平寺大野道路は福井県福井市と大野市を結ぶ全長 26km の自動車専用道路である。永平寺大野道路は福井県嶺北地域の平野部と山間部を結ぶ道路であり、冬期には気温の低下や山岳による日射の遮蔽による路面凍結が生じる可能性が高い。永平寺大野道路は現在永平寺東 IC～上志比 IC 間および勝山 IC

～大野 IC 間が未供用であるが、全線供用開始後の冬期道路管理適正化を行うためにはこれらの未供用区間を含めた凍結危険性の評価が必要である。

そこで、本節では永平寺大野道路について未供用区間を含めた凍結危険性評価を SAFF モデルを用いて行った。以下に詳細を示す。

#### 6.2.1 計算条件

凍結危険性評価では、永平寺大野道路福井北 IC～大野 IC 間において路面温度  $T_s$  の時間および空間変化を計算し、路面温度が氷点下となる時間の空間分布を求めることで路面凍結が生じる可能性を求めた。気象条件は福井県福井から大野間の 1 月の晴天日平年値を、太陽高度および方位角は 1 月 15 日の各地点における値をそれぞれ用いた。また、デジタル標高データ (DSM) には 50m メッシュ数値標高地図を用いた。

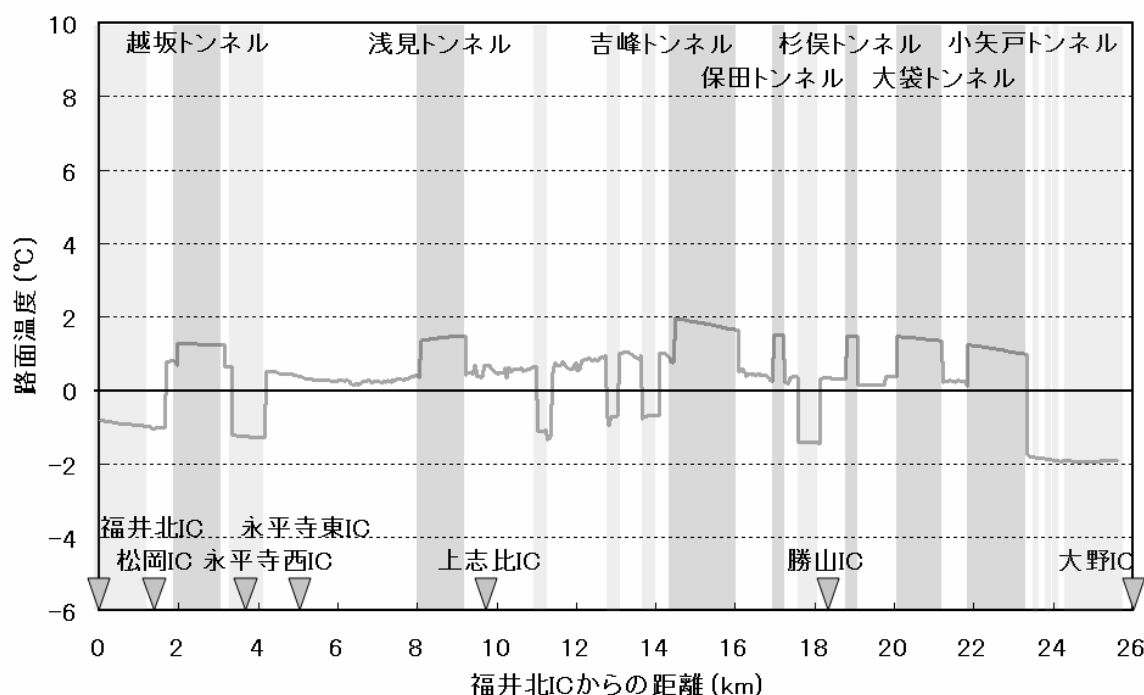


図 6-1 永平寺大野道路 福井北 IC～大野 IC 間の路面温度分布 (0:00)

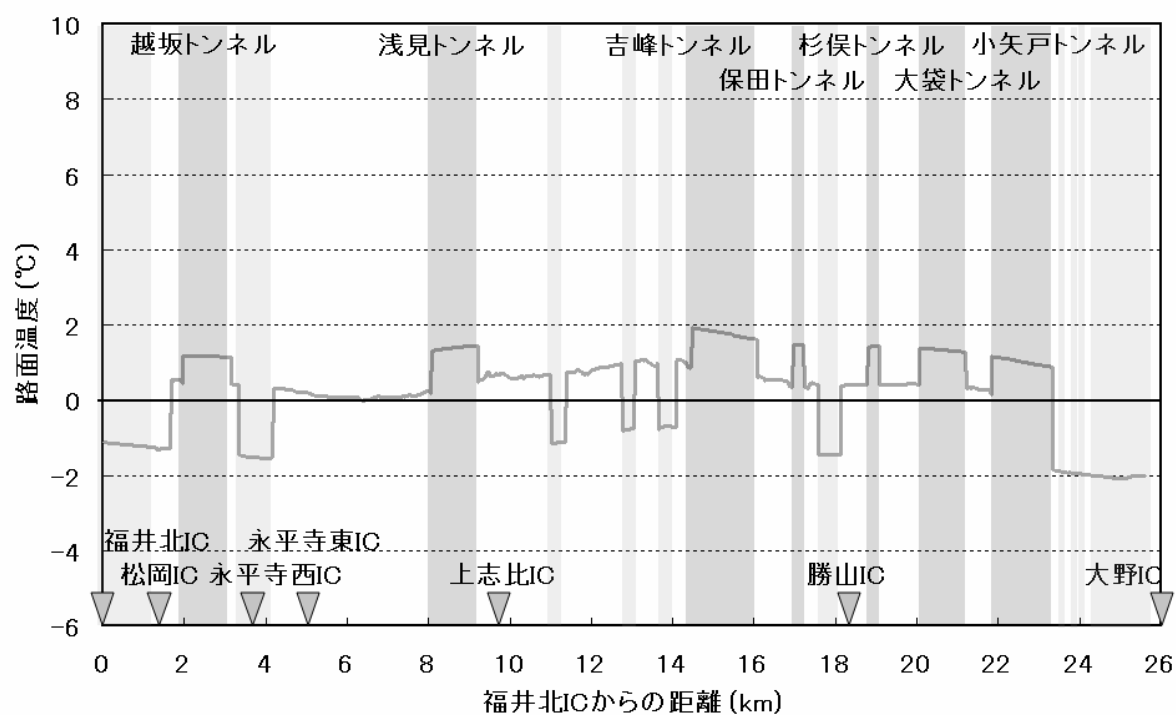


図 6-2 永平寺大野道路 福井北 IC～大野 IC 間の路面温度分布 (2:00)

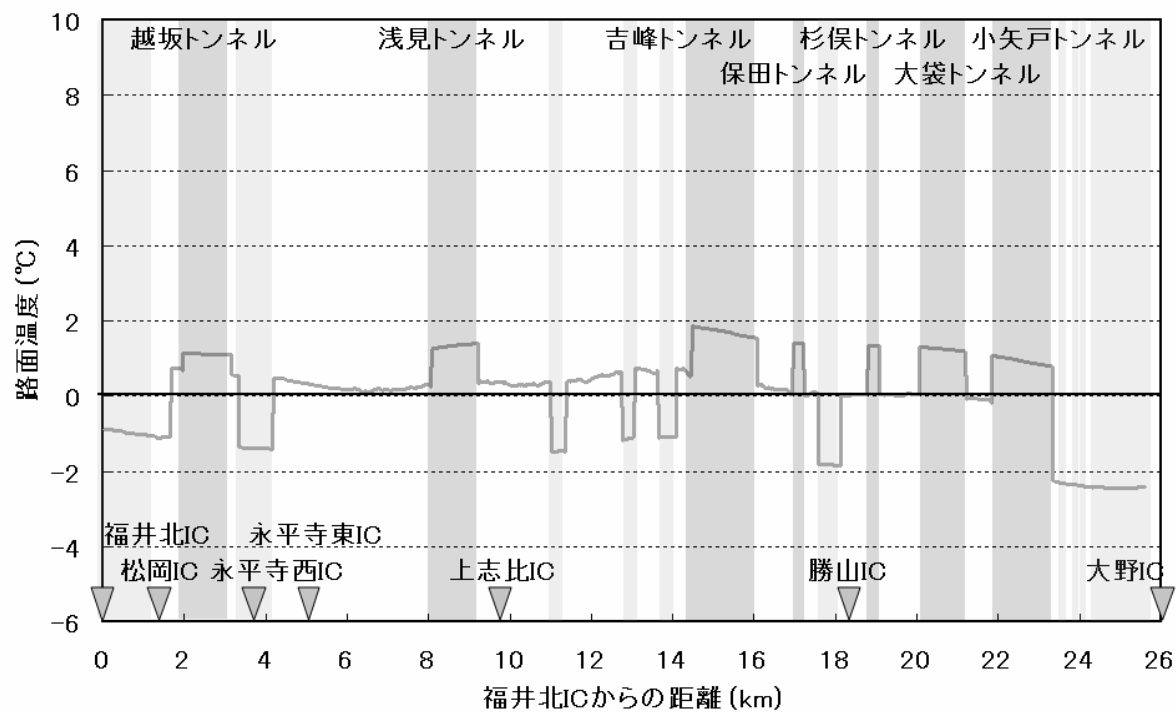


図 6-3 永平寺大野道路 福井北 IC～大野 IC 間の路面温度分布 (4:00)



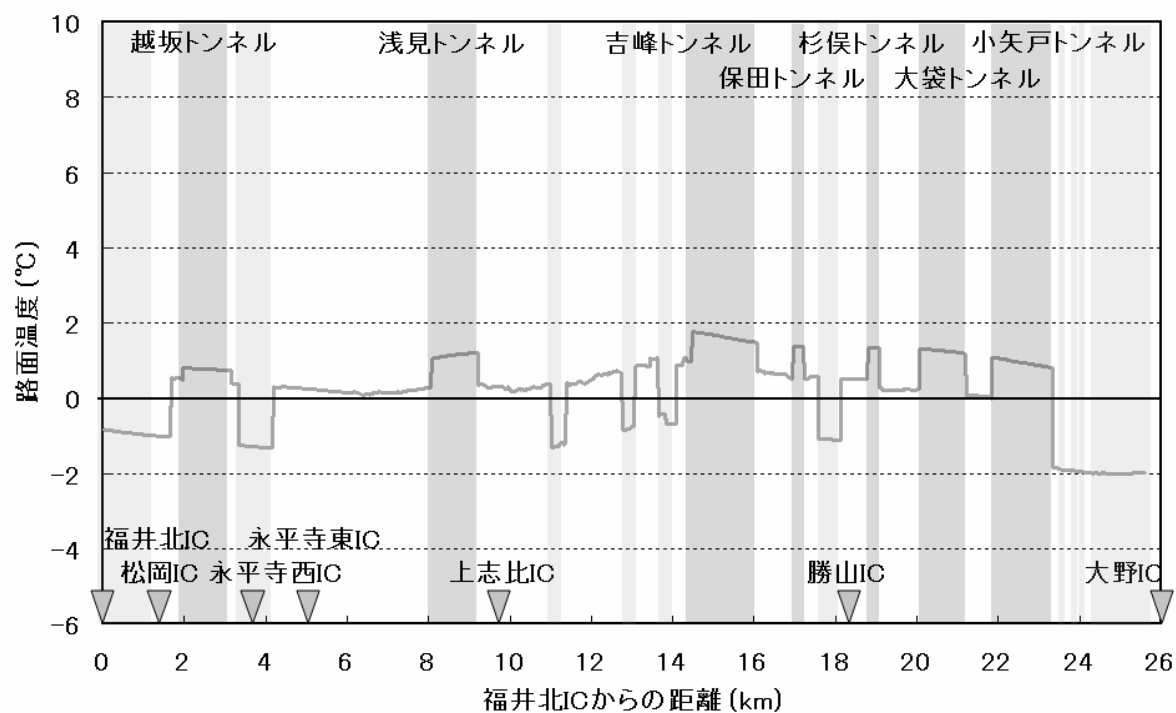


図 6-4 永平寺大野道路 福井北 IC～大野 IC 間の路面温度分布 (6:00)

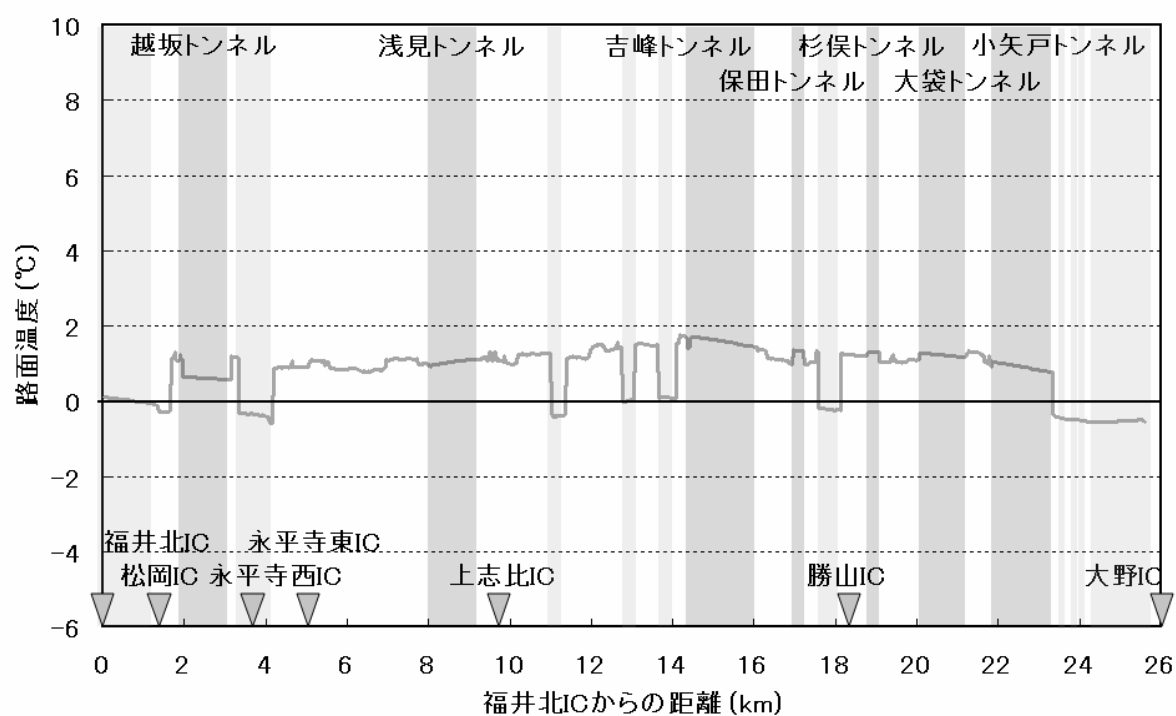


図 6-5 永平寺大野道路 福井北 IC～大野 IC 間の路面温度分布 (8:00)

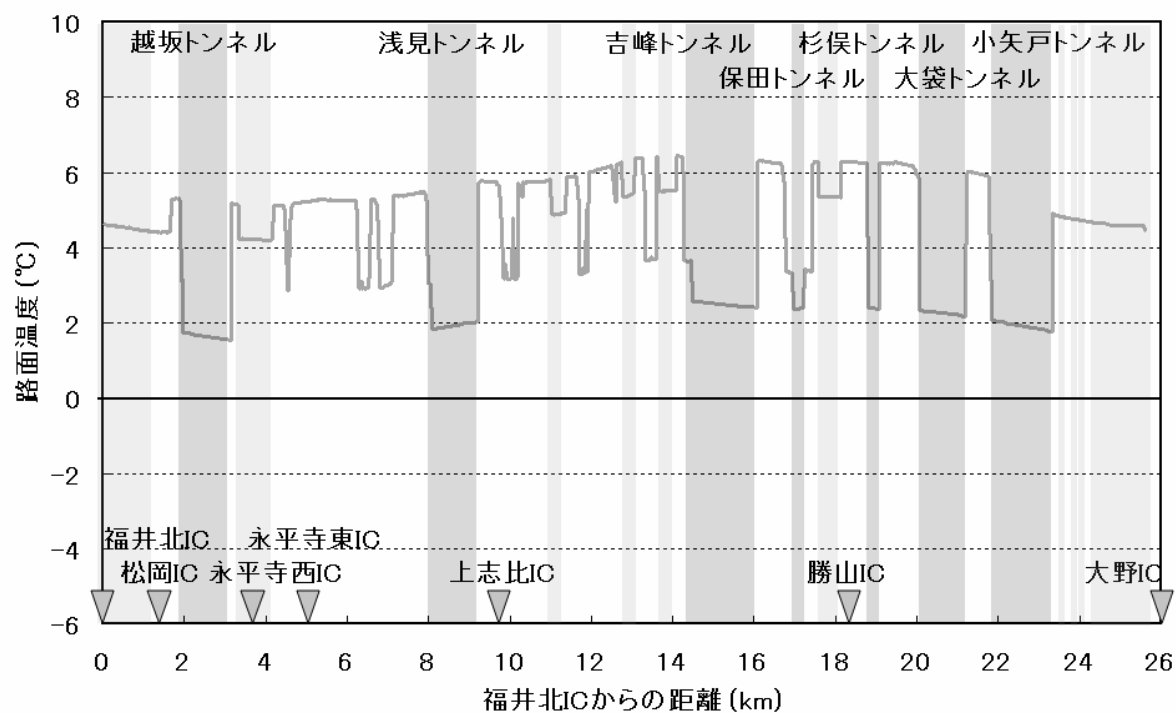


図 6-6 永平寺大野道路 福井北 IC～大野 IC 間の路面温度分布 (10:00)

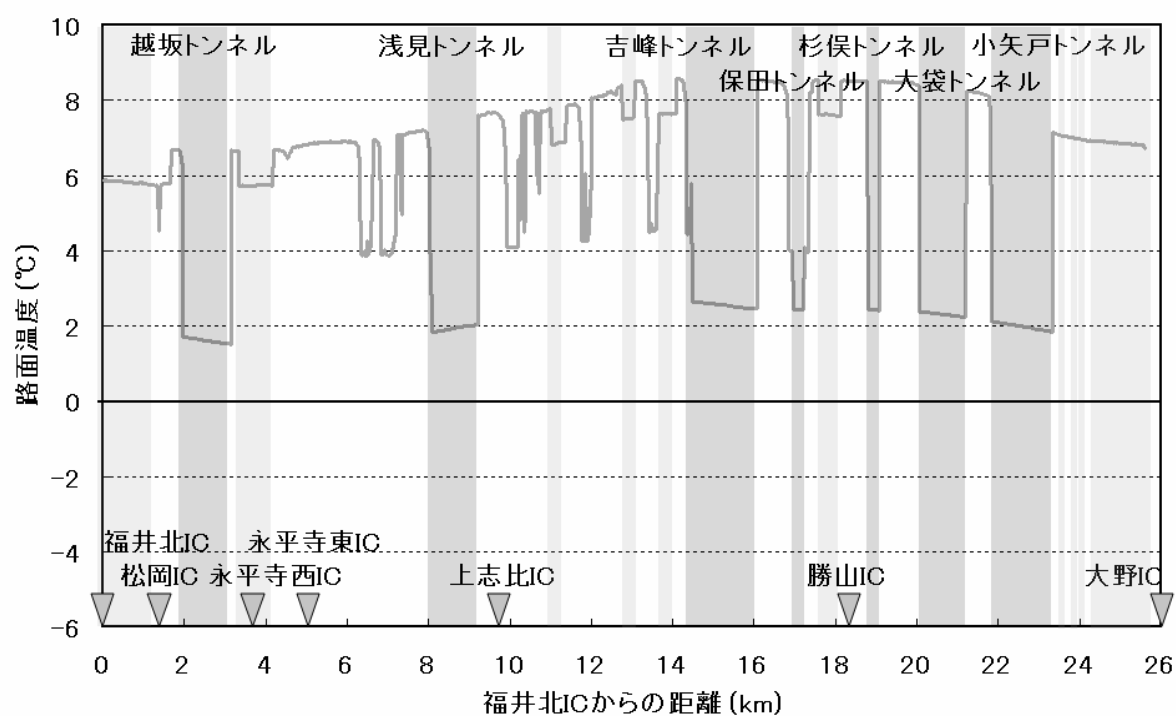


図 6-7 永平寺大野道路 福井北 IC～大野 IC 間の路面温度分布 (12:00)

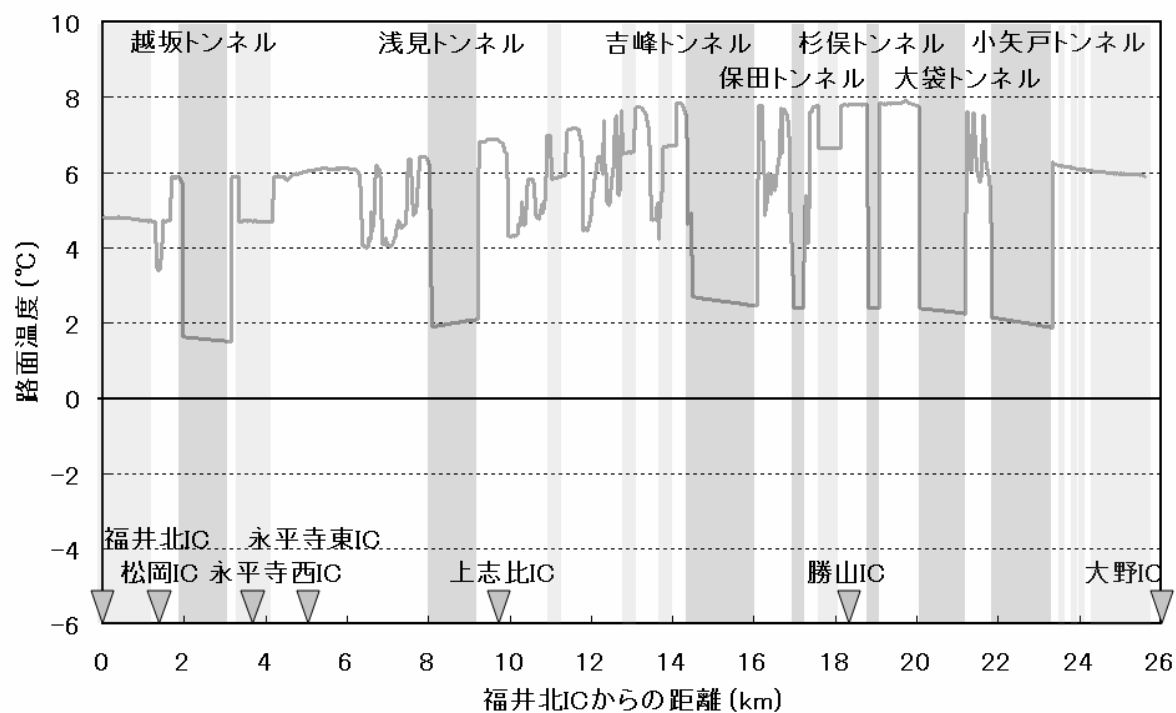


図 6-8 永平寺大野道路 福井北 IC～大野 IC 間の路面温度分布 (14:00)

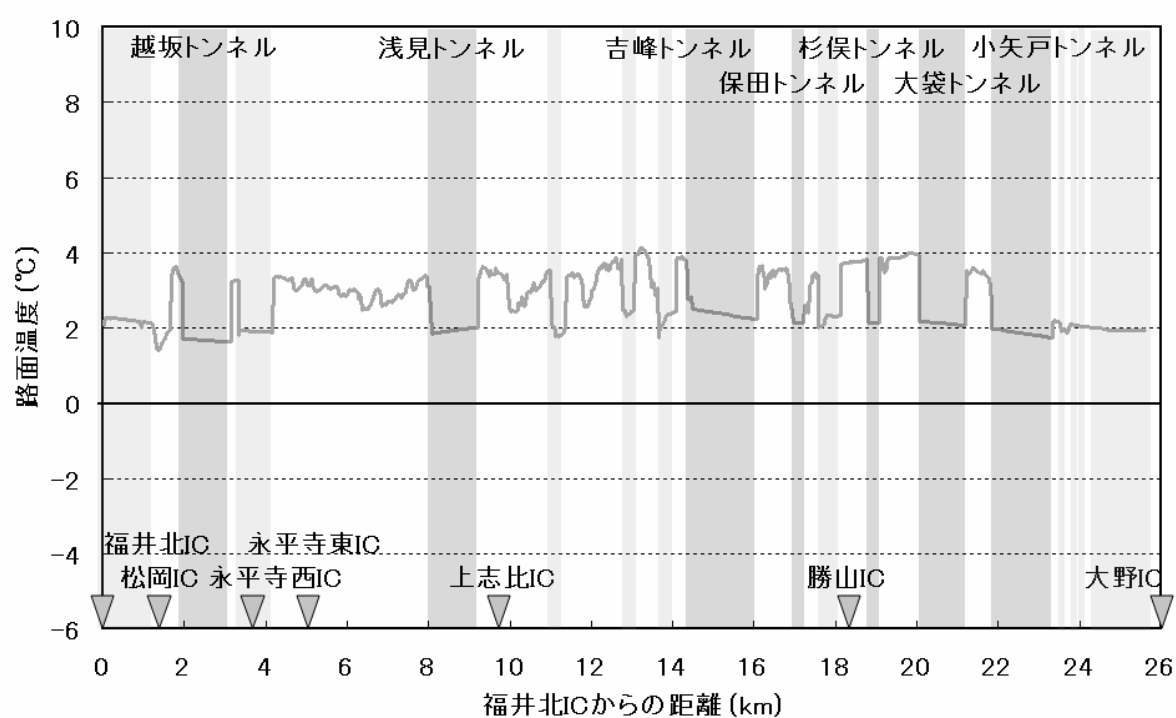


図 6-9 永平寺大野道路 福井北 IC～大野 IC 間の路面温度分布 (16:00)

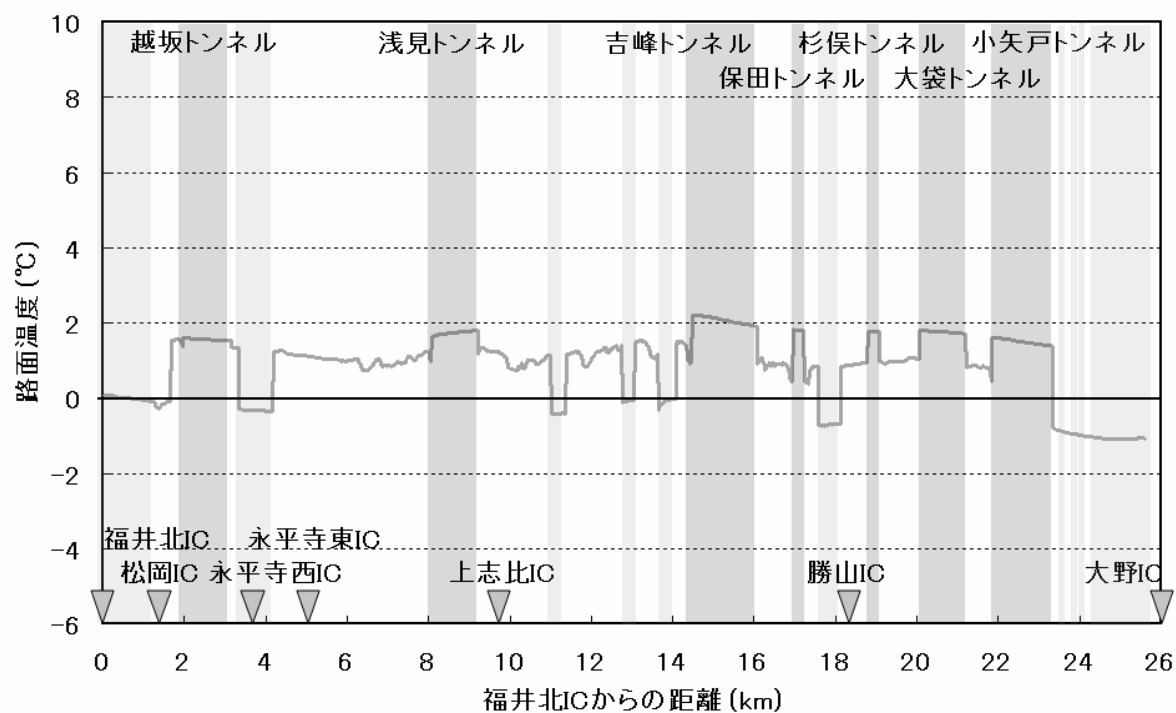


図 6-10 永平寺大野道路 福井北 IC～大野 IC 間の路面温度分布 (18:00)

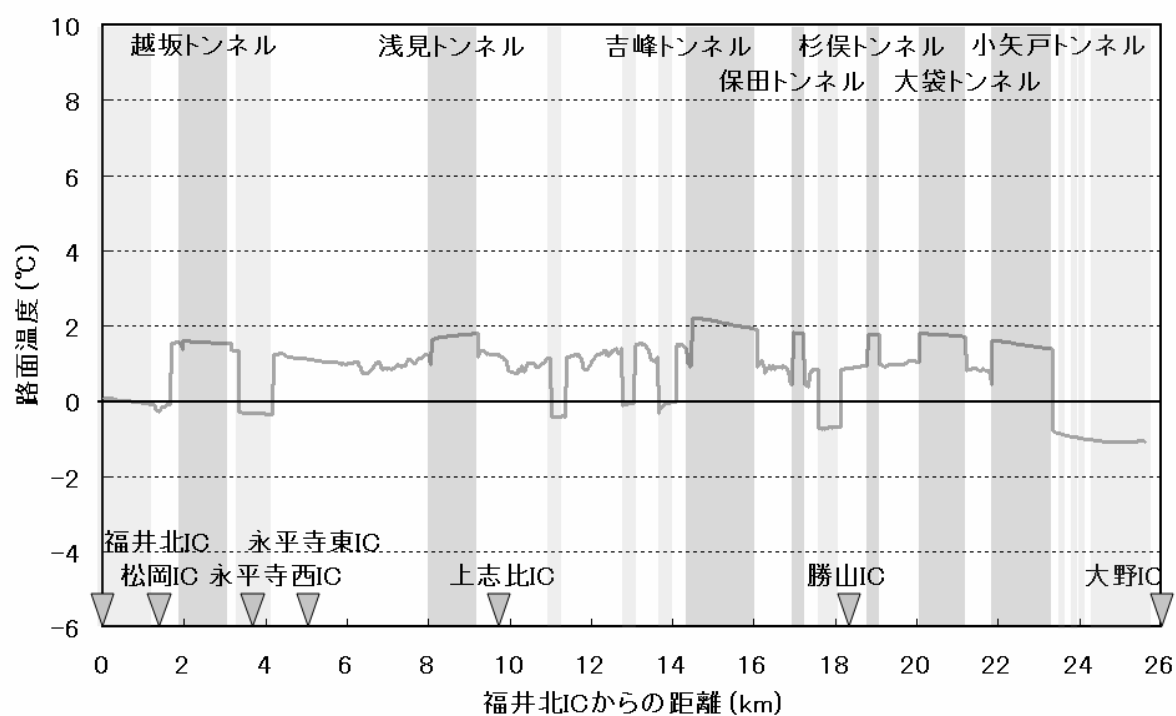


図 6-11 永平寺大野道路 福井北 IC～大野 IC 間の路面温度分布 (20:00)

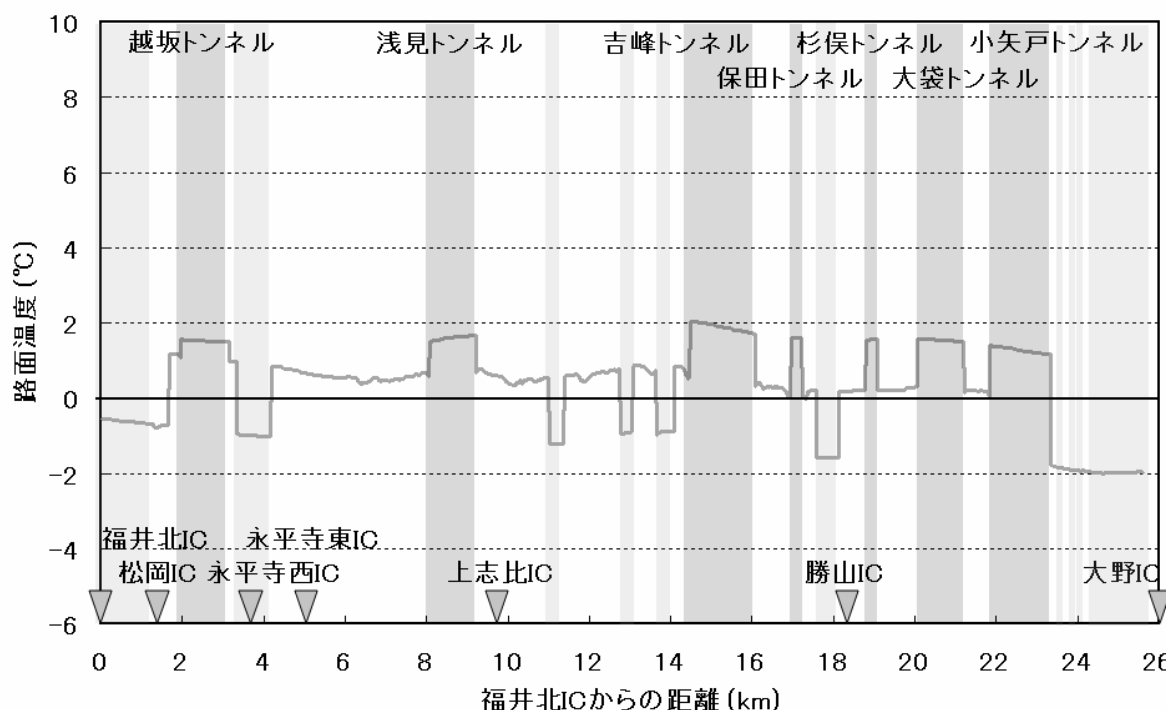


図 6-12 永平寺大野道路 福井北 IC～大野 IC 間の路面温度分布 (22:00)

### 6.2.2 計算結果

図 6-1 から図 6-12 は永平寺大野道路福井北 IC から大野 IC 間の  $T_s$  の空間分布を 2 時間毎に表したものである。図中水色の区間は橋梁を、灰色の区間はトンネルをそれぞれ示す。

$T_s$  は全時間帯を通して橋梁部で低く、土工部で高くなる傾向にあった。土工部と橋梁部の  $T_s$  の差は日中は 12:00 では小さく 1 度前後であるが、日の出直前の 6:00 には 1.5°C 以上に達した。このとき、勝山 IC および永平寺東 IC 付近では橋梁のみ  $T_s$  が氷点下になっていることから、これらの区間では局所的な路面凍結が生じる可能性があり他の区間より危険度が高いと考えられる。

永平寺東 IC から大野 IC の間では、道路の南および西側にある山地により日射が遮蔽され、断続的に  $T_s$  が低くなる区間が現れた。この傾向は 12:00 に最も顕著となり、日向と日陰の  $T_s$  の差は最大で 4°C となった。この傾向は日没後も続き、18:00 には 11km, 13km, 14km お

よび 18km 地点で  $T_s$  が氷点下となった。

また、福井北 IC および大野 IC 付近の平地区間では他の区間よりも  $T_s$  が低くなる傾向にあった。これは平地区間では山岳などから路面に入射する輻射および日射反射フラックスが山岳区間と比較して小さいためと推察される。

図 6-13 は福井北 IC～大野 IC 間における  $T_s$  の 24 時間積算値(デグリーアワー)  $T_d$  の空間分布を示したものである。 $T_d$  は平地区間である福井北 IC 付近、大野 IC 付近と永平寺西 IC～勝山 IC 間の橋梁部で低くなった。特に、大野 IC 付近では  $T_d$  は負の値となり、凍結可能性が特に高いことが示された。

図 6-14 は福井北 IC～大野 IC 間において 1 日のうち  $T_s$  が氷点下であった時間の積算値(凍結危険時間)  $t_f$  を示す。 $t_f$  は  $T_d$  の空間分布と同様の傾向を示し、平地区間および山岳区間の橋梁部で大きくなった。他方、最も標高が高い 21km 地点では  $t_f$  は 6 時間から 7 時間程度であった。

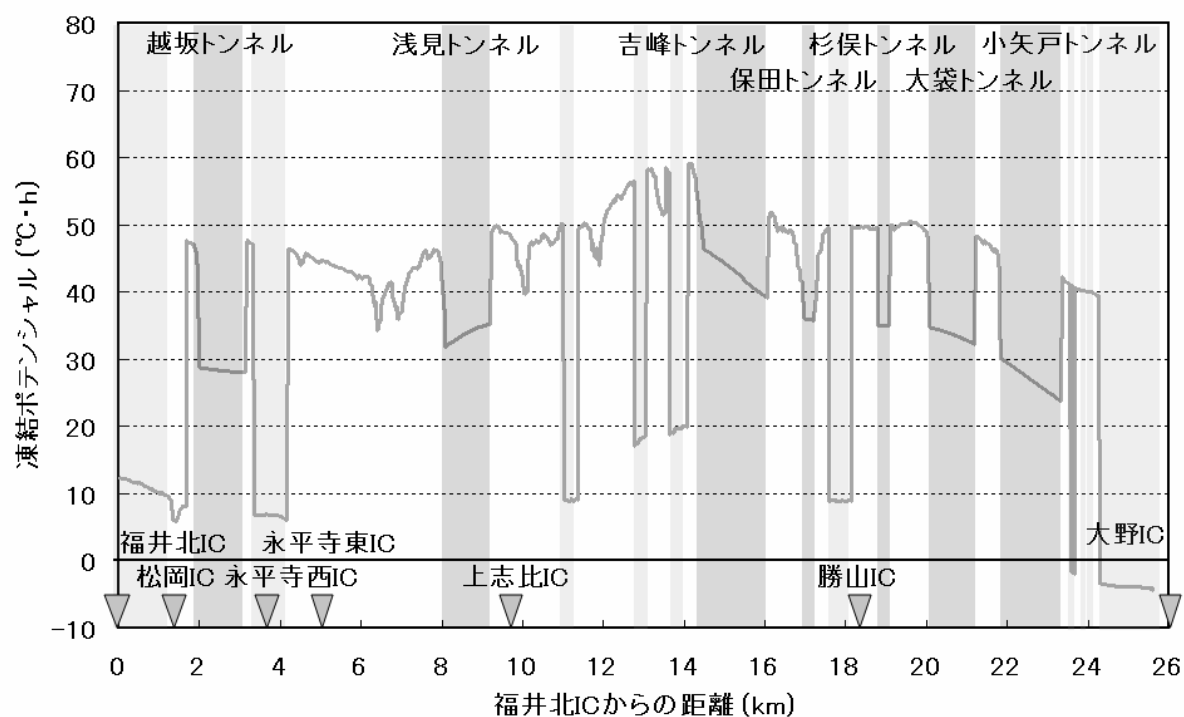


図 6-13 永平寺大野道路 福井北 IC～大野 IC 間の 24 時間路面温度積算値の分布

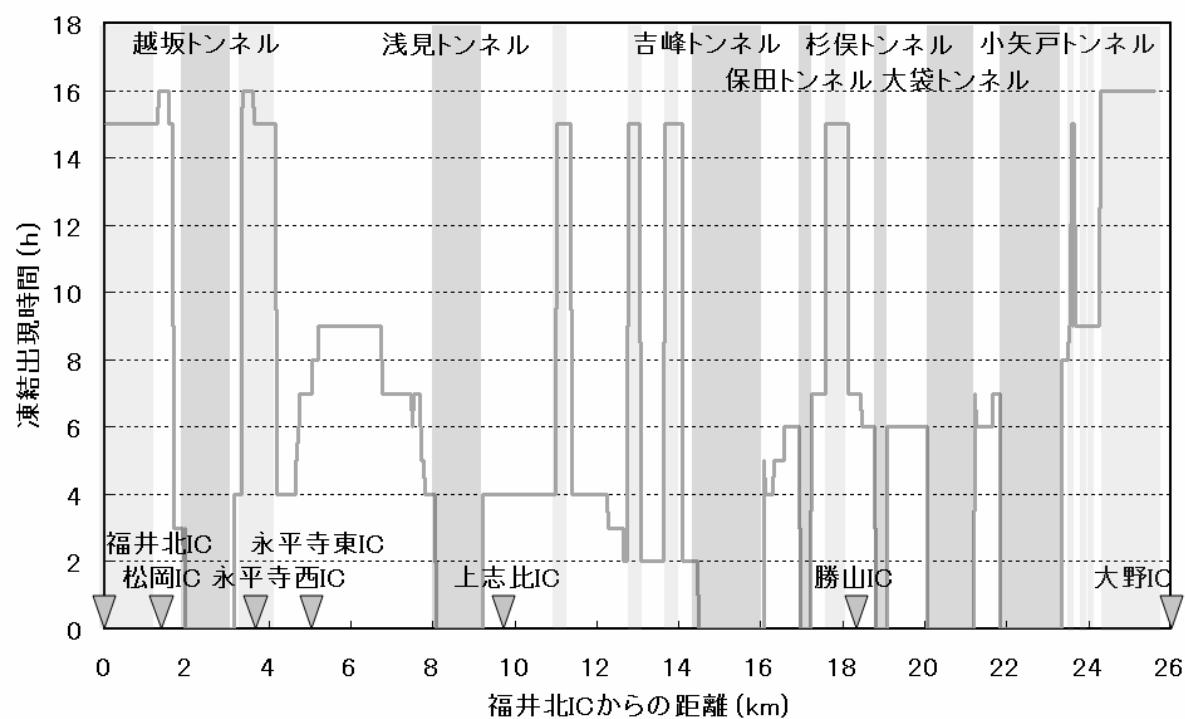


図 6-14 永平寺大野道路 福井北 IC～大野 IC 間の凍結可能時間の分布

以上の結果より、永平寺大野道路では、晴天時には福井北ICおよび大野IC付近の平野区間と山岳区間の橋梁部で特に凍結危険性が高く、その他の山岳区間では凍結危険性は相対的に低いことが推察される。また、山岳区間の橋梁部では局所的に路面温度が氷点下になる可能性があり、路面状態の急激な変化が生じることが予想される。

### 6.3 北近畿豊岡自動車道における広域路面温度予測モデルの適用

北近畿豊岡自動車道は兵庫県丹波市と豊岡市を結ぶ自動車専用道路である。北近畿豊岡自動車道は、春日IC(丹波市)～和田山IC(朝来市)の区間が春日和田山道路として供用中であり、和田山IC～八鹿IC(養父市)は和田山八鹿道路として建設が進められている。北近畿豊岡自動車道は積雪地域と非積雪地域を結ぶ道路であり、冬期には路面凍結や積雪に起因する事故が生じやすい路線となっている。そのため、春日和田山道路にはトンネル坑口付近や橋梁部など路面凍結の可能性が高い箇所に無散水融雪装置が設置されており、路面状態の急変を防いでいる。和田山八鹿道路でも凍結危険性が高い箇所への無散水融雪システムの設置が検討されており、融雪システムの導入効果を定量的に評価する必要があった。

本節では、和田山八鹿道路の凍結危険性が高い箇所に無散水融雪システムを導入した場合の効果について、SAFFモデルを用いて定量的な評価を行ったのでその結果を示す。

#### 6.3.1 導入効果の検討対象となる無散水融雪システムの概要

本計算では、春日和田山道路和田トンネルに設置された無散水融雪システムと同様の構成<sup>1)</sup>である。水平Uチューブ(Horizontal U-Tube, HUT)、掘削熱交換杭システム(Borehole Heat Exchange System, BHES)および蓄熱水槽(Reservoir Heat Collecting System, RHCS)を採熱

部として有し、土工部および橋梁部に融雪舗装を持つ無散水融雪システムを導入することを想定し、採熱部、融雪舗装および送水管とその周辺地盤の温度を計算した。図6-15に無散水融雪システムの概要を示す。本システムでは、路面温度が低下したときにHUTでトンネル内の浅層地中熱を、BHESで深層地中熱を採取し、暖められた流体が融雪舗装に流入することで舗装温度を上昇させる。これに加え、厳寒時にはRHCSに蓄えられた温度の高い流体が融雪システムに流入することで凍結防止および融雪効果を向上させる。また、それ以外の状況下ではHUT、BHESおよびRHCS間で流体を循環させ、RHCS内の流体温度を上昇させる。

#### 6.3.2 計算条件

本計算では、和田山八鹿道路の建屋川橋および畑トンネルを対象とし、融雪システム導入時および未導入時の $T_s$ の経時変化を求めた。計算では、兵庫県豊岡における2005年から2009年の1月および2月の気象観測値を基に、SAFFモデルを用いて地形的要因を考慮した気象条件を求めた。

地盤、舗装および融雪システム内流体温度は春日和田山道路和田トンネルに設置された無散水融雪システムで計測された値を用いた<sup>2)</sup>。

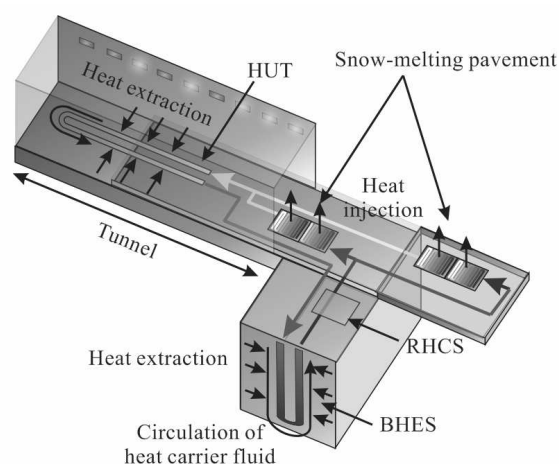


図 6-15 融雪システム導入効果の検討に用いる無散水融雪システムの構成

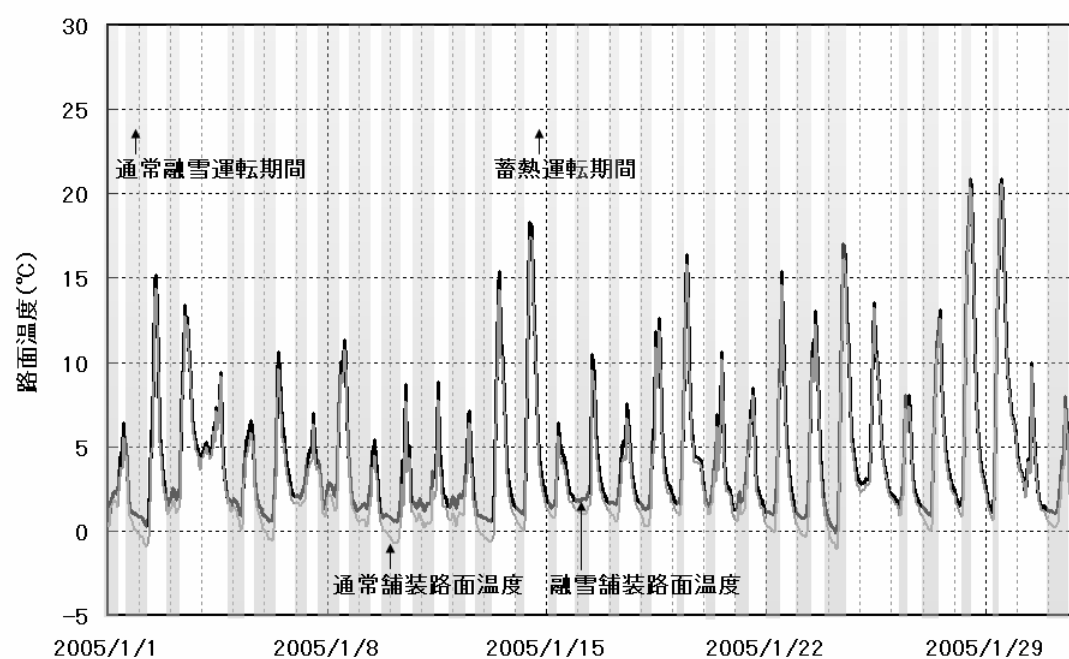


図 6-16 融雪システム導入時および未導入時の路面温度経時変化(2005 年 1 月)

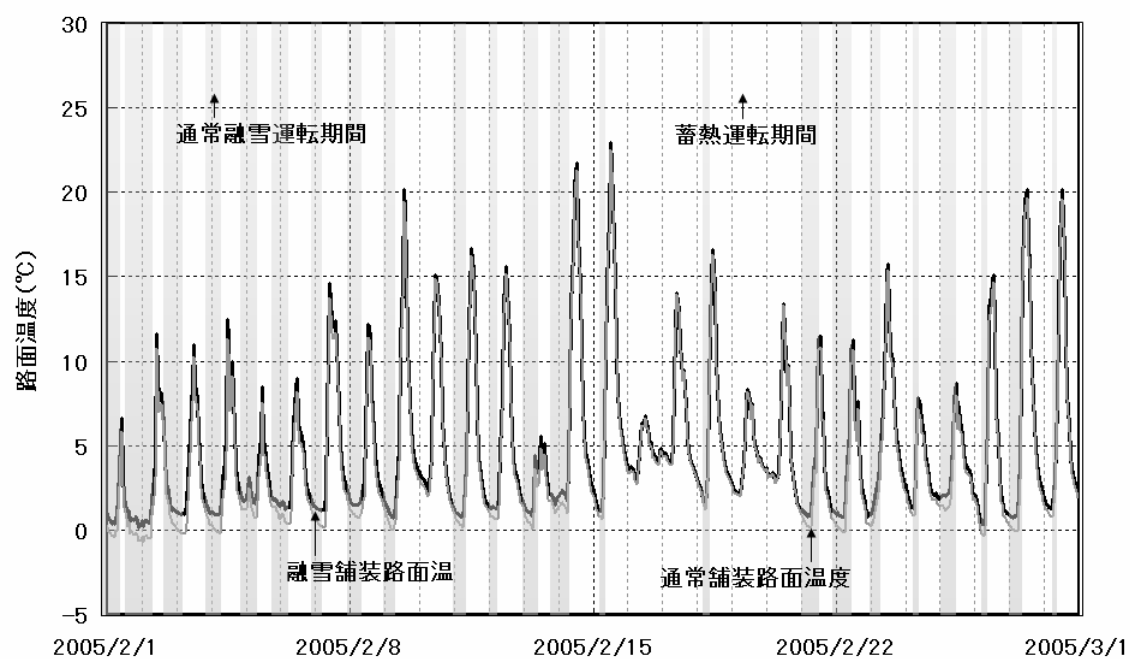


図 6-17 融雪システム導入時および未導入時の路面温度経時変化(2005 年 2 月)



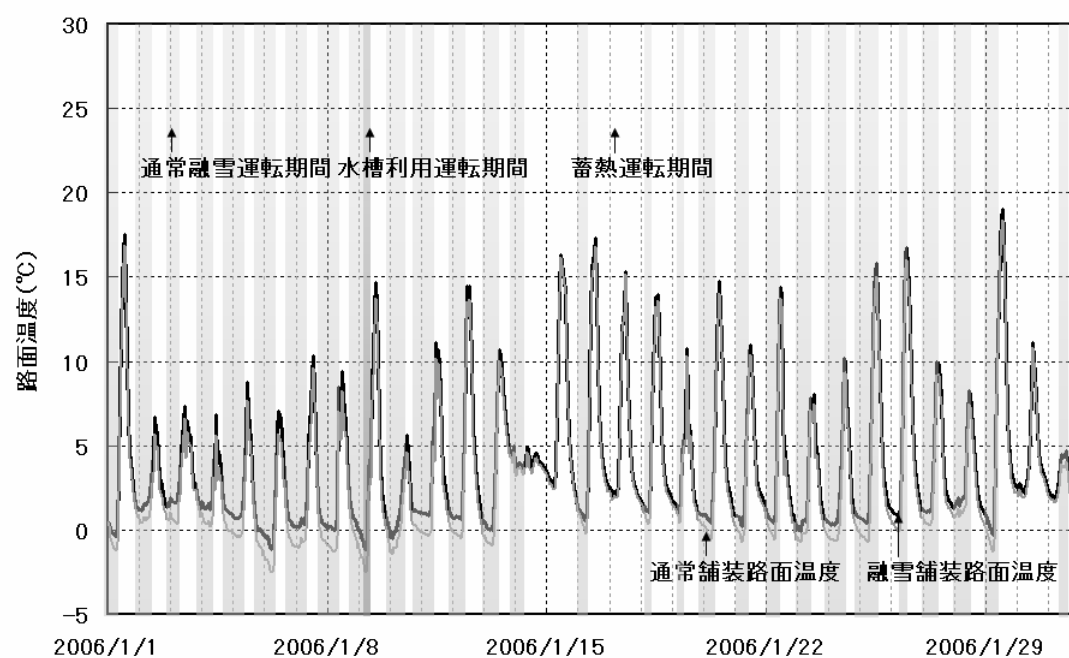


図 6-18 融雪システム導入時および未導入時の路面温度経時変化(2006 年 1 月)

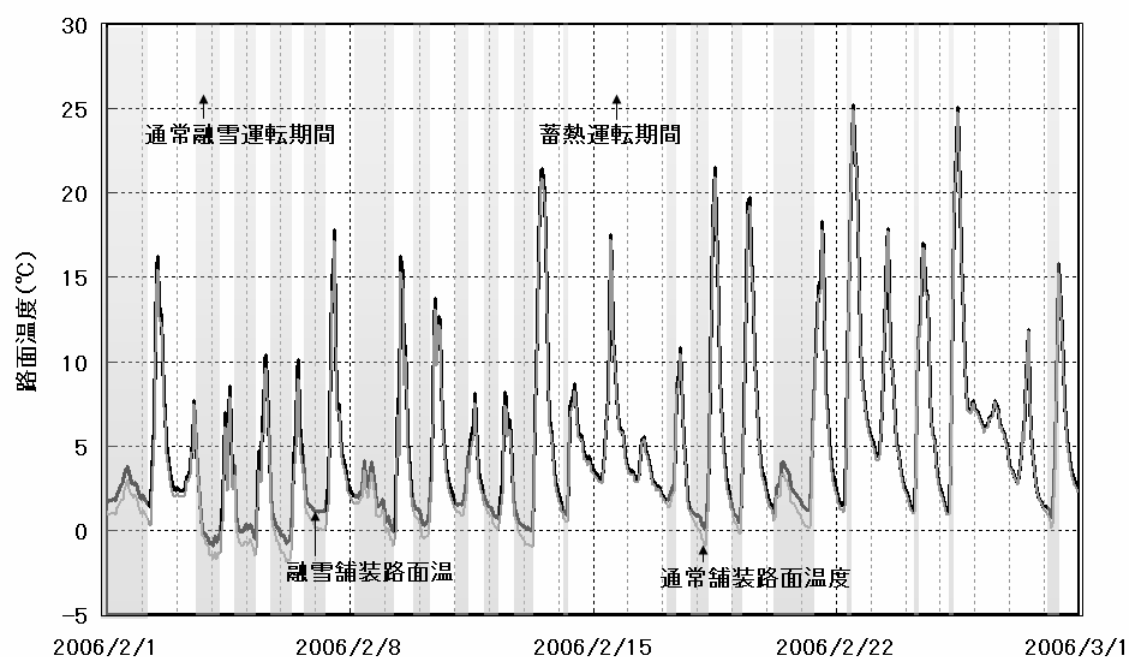


図 6-19 融雪システム導入時および未導入時の路面温度経時変化(2006 年 2 月)

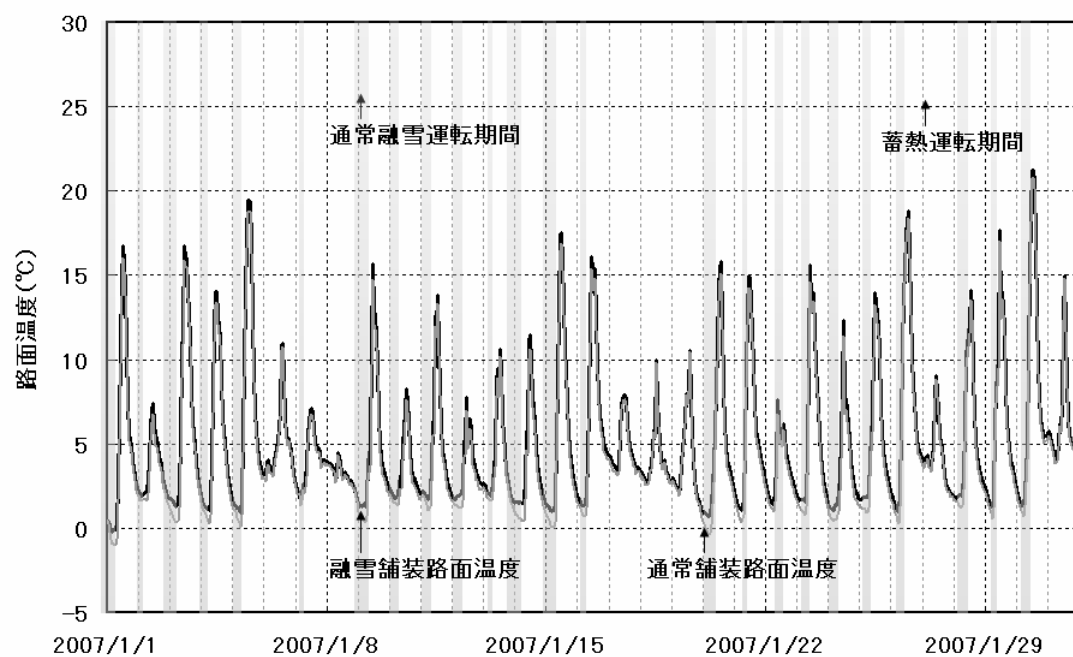


図 6-20 融雪システム導入時および未導入時の路面温度経時変化(2007 年 1 月)

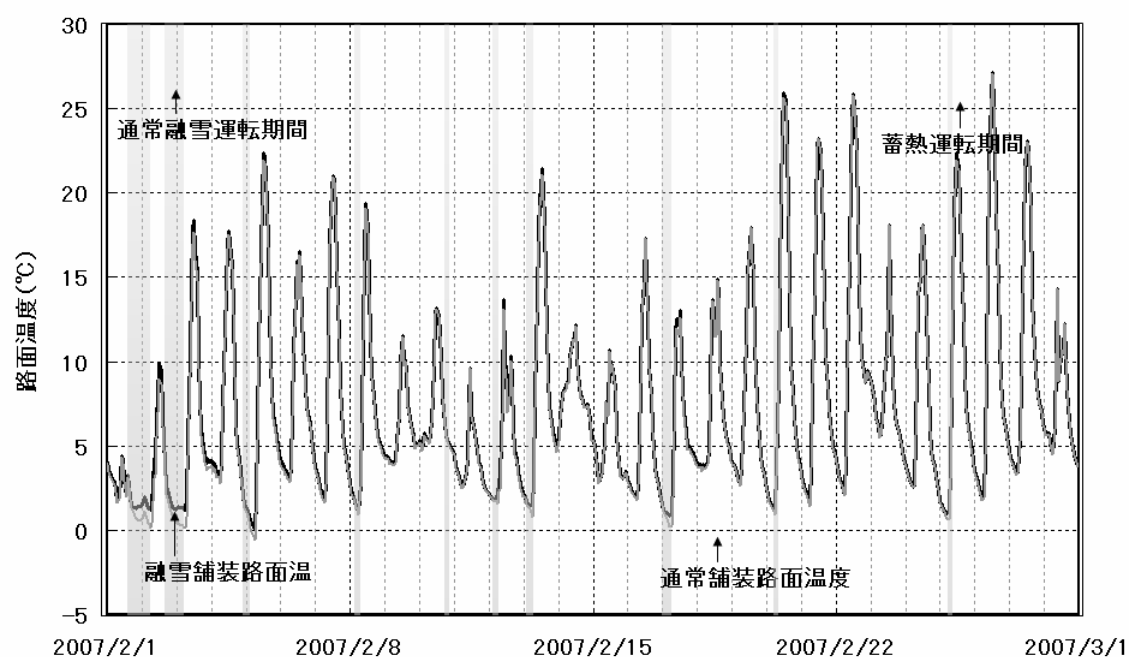


図 6-21 融雪システム導入時および未導入時の路面温度経時変化(2007 年 2 月)

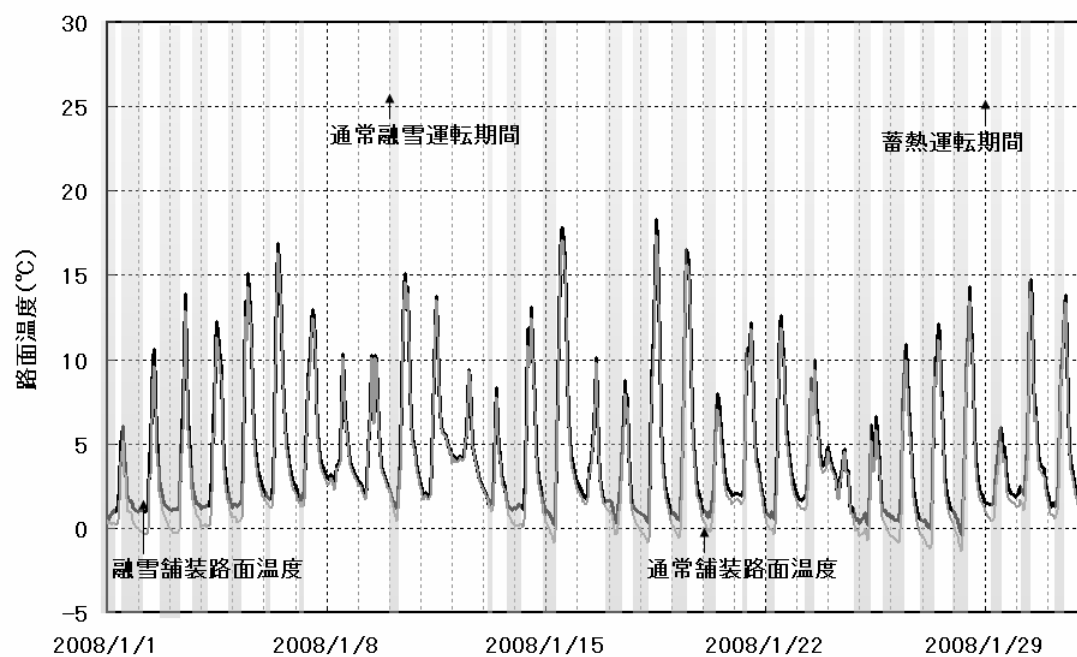


図 6-22 融雪システム導入時および未導入時の路面温度経時変化(2008 年 1 月)

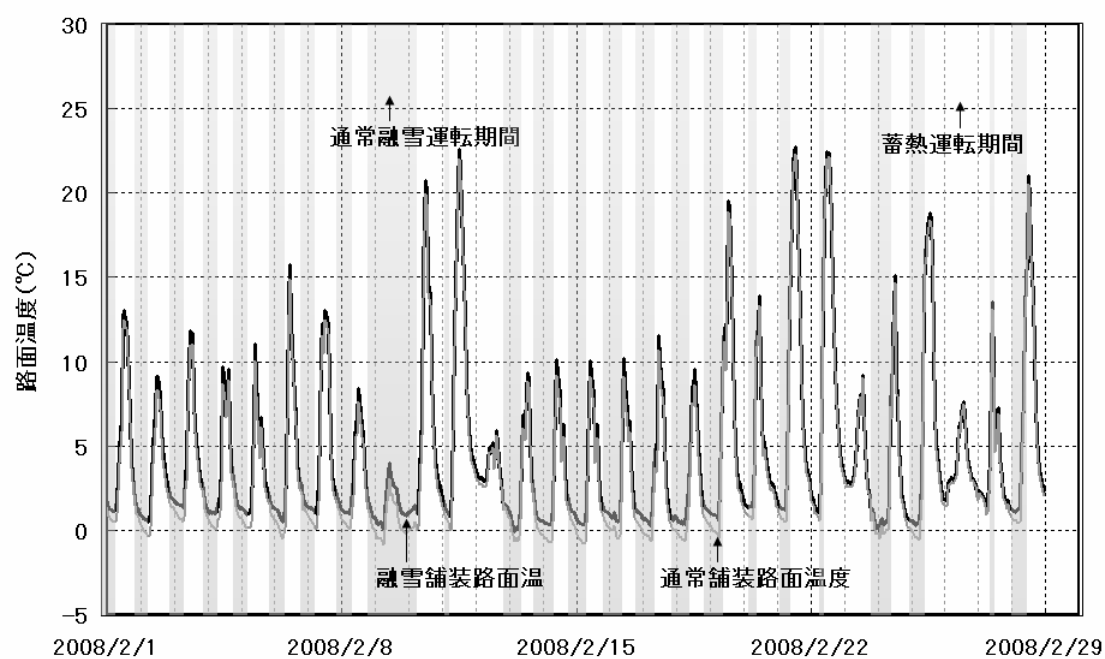


図 6-23 融雪システム導入時および未導入時の路面温度経時変化(2008 年 2 月)

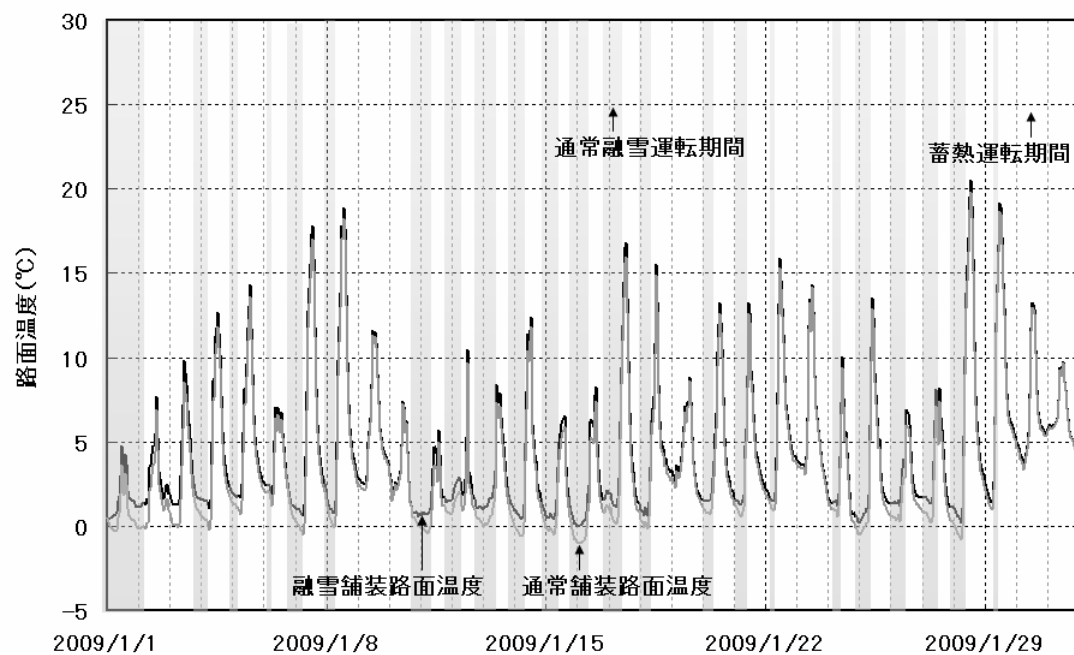


図 6-24 融雪システム導入時および未導入時の路面温度経時変化(2009 年 1 月)

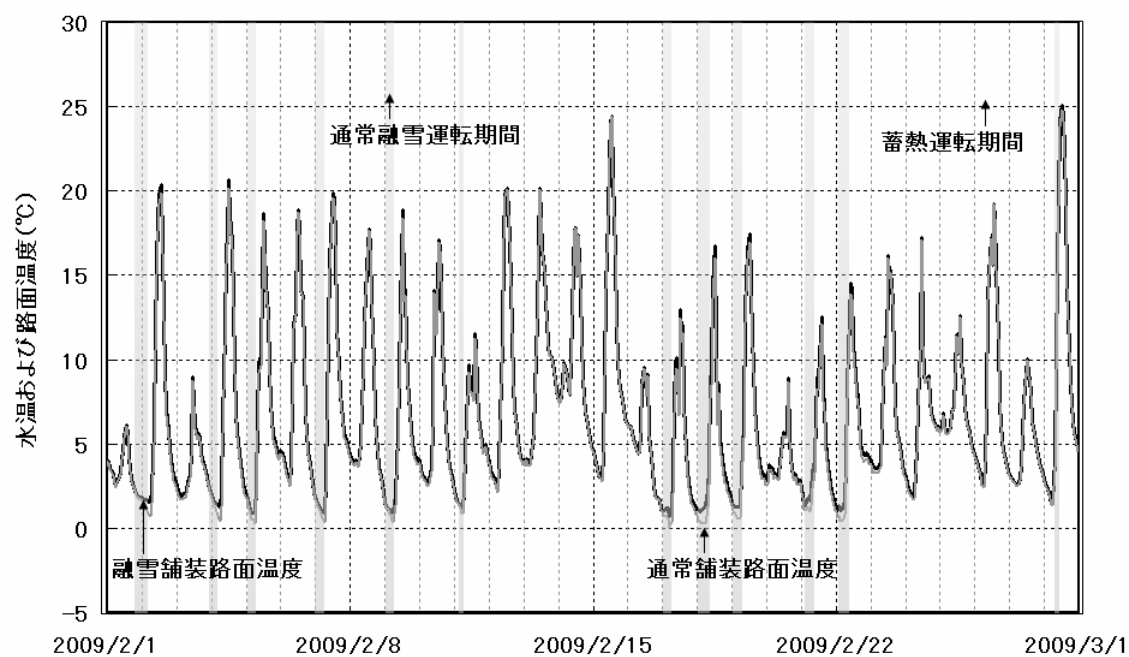


図 6-25 融雪システム導入時および未導入時の路面温度経時変化(2009 年 2 月)

表 6-1 融雪システム導入時および未導入時の凍結危険時間および融雪システム導入による凍結防止時間

	融雪舗装 凍結危険時間 $t_{fs}$ (h)	通常舗装 凍結危険時間 $t_{fn}$ (h)	凍結防止時間 $t_p$ (h)
2005 年 1 月	1.67	50.33	48.66
2005 年 2 月	0.00	38.67	38.67
2006 年 1 月	32.00	155.83	123.83
2006 年 2 月	28.67	67.33	38.66
2007 年 1 月	3.67	9.67	6.00
2007 年 2 月	0.00	2.50	2.50
2008 年 1 月	2.33	79.66	77.33
2008 年 2 月	1.16	77.16	76.00
2009 年 1 月	0.00	65.66	65.66
2009 年 2 月	0.00	0.00	0.00

図 6-16 から図 6-25 は融雪システム導入時および未導入時の 2005 年から 2009 年冬の  $T_s$  の経時変化を示したものである。図中黄色は融雪システム導入時に融雪運転が行われた時間を、橙色は蓄熱水槽利用運転が行われた時間を、白色は蓄熱運転が行われた時間をそれぞれ示す。

融雪システム導入時の  $T_s$  は、融雪運転時には融雪システム未導入時の  $T_s$  と比較して  $1^{\circ}\text{C}$  程度高くなった。これにより、融雪システム未導入時と比較して  $T_s$  が氷点下となる時間が短縮された。表 6-1 は融雪システム導入時および未導入時の凍結危険時間、 $t_{fs}$  および  $t_{fn}$  と融雪システム導入によって凍結が防止された時間  $t_p$  を示す。 $t_{fs}$  は  $t_{fn}$  の 0% から 40% 程度であり、融雪システムを未導入時と比較して凍結時間が大きく減少した。特に、気温が平年より高い傾向が続いた 2005 年、2007 年、2008 年および 2009 年では、融雪舗装の凍結時間は 5 時間／月（10 分／日）未満であった。一方、2006 年は短波放射フラックスが小さく気温が低い状態が続いたため、 $t_{fs}$  は長くなった。また、2006

年 2 月は  $t_{fs}$  に対する  $t_{fn}$  の比が大きくなった。これは 2006 年 1 月の融雪システム運転時間が長く、HUT および BHES 周辺地盤の温度低下が生じ採熱量が減少したためだと考えられる。

#### 6.4 おわりに

本章では、SAFF モデルを用いた冬期道路管理の適正化の例を示した。また、SAFF モデルを用いることで、建設中および計画段階にある路線について凍結危険性の評価や融雪システム導入効果などの定量的な評価が可能となった。今後は、さらに対象道路で路線温度データを蓄積、比較し、モデルの制度及び信頼性を高める。

## 参考文献

- 9) 齊田光, 藤本明宏, 福原輝幸 : 和田トンネル融雪システムのエネルギー収支, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol.63, pp.289~290, 2008.
- 10) Akira Saida, Akihiro Fujimoto, Teruyuki Fukuhara : Performance of snow-melting system with two ground-heat extraction systems, proceedings of IS2012 international conference, 2012.

## 本章で用いた記号

$T_s$	: 路面温度	(°C)
$T_d$	: 路面温度の 24 時間積算値	(°C・h)
$t_f$	: 凍結危険時間	(h)
$t_{fs}$	: 融雪システム導入時の凍結危険時間	(h)
$t_{fn}$	: 融雪システム未導入時の凍結危険時間	(h)
$t_p$	: 融雪システム導入による凍結防止時間	(h)

---

謝辞

福井大学工学部建築建設工学科福原輝幸教授には本論文作成にあたり，始終適切なご指導，ご助言をいただきました．また，本研究以外のプロジェクトから私生活に至るまで適切な指導，助言および協力をしていただきました．心より深く感謝申し上げます．

また，この環境熱・水理研究室で3年間を共に過ごし，観測などにおいては的確で親切なご指導をいただきました福井大学工学部環境水理研究室技官の脇敬一氏，福井大学特別研究員の渡邊洋氏に心より深く感謝いたします．

野外観測では，国土交通省近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所および福井県土木事務所から観測施設および装置の提供を頂きました．観測実施時に様々な形でご協力を頂いた豊岡河川国道事務所，朝来国道維持出張所および福井県土木事務所の方々に深く感謝いたします．

本研究において観測や実験などでご指導，ご助言およびご協力をいただきました藤本明宏氏，寺崎寛章氏に心より深く感謝いたします．また，環境熱・水理研究室で勉学を共にした田中貴子女史，山路昂央氏，草間政寛氏，藤井浩司氏，村松宏樹氏，山元謙侑氏，片桐洋介氏，青山恵理女史に深く感謝いたします．

最後になりましたが，小生を支えて下さった家族に深く感謝致します．